

ВЕСЦІ

НАЦЫЯНАЛЬнай АКАДЭМІІ НАВУК БЕЛАРУСІ

СЕРЫЯ ФІЗІКА-ТЭХНІЧНЫХ НАВУК. 2020. Т. 65, №3

ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

СЕРИЯ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК. 2020. Т. 65, №3

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

Выходит четыре раза в год

Учредитель – Национальная академия наук Беларуси

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

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

Г л а в н ы й р е д а к т о р

Сергей Антонович Чижик –

Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

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

А. П. Ласковнёв – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь (*заместитель главного редактора*)

И. А. Старостина (*ведущий редактор журнала*)

А. В. Белый – Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

П. А. Витязь – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

А. Я. Григорьев – Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь

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

А. Ф. Ильющенко – Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии – Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа, 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
А. М. Малярович – Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь
Н. К. Мышкин – Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь
О. Г. Пенязков – Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
В. М. Федосюк – Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению, Минск, Беларусь
М. Л. Хейфец – Институт прикладной физики 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 – Болгарская академия 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 – Международная инженерная академия, Технический университет Вены, Вена, Австрия
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. 118, 220072, г. Минск, Республика Беларусь.
Тел.: + 375 17 374-02-45; e-mail: ftvesti@mail.ru
vestift.belnauka.by*

ИЗВЕСТИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ.

Серия физико-технических наук. 2020. Т. 65, №3

Выходит на русском, белорусском и английском языках

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

Подписано в печать 21.09.2020. Выход в свет 29.09.2020. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 14,88. Уч.-изд. л. 16,4. Тираж 72 экз. Заказ 165.
Цена номера: индивидуальная подписка – 12,32 руб., ведомственная подписка – 29,31 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, 2020

PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

PHYSICAL-TECHNICAL SERIES, 2020, vol. 65, no. 3

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

Issued four times a year

Founder is the National Academy of Sciences of Belarus

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

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

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

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

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

Alexander 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 – Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

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

Andrei Ya. Grigoriev – V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of the National Academy of Sciences
of Belarus, Gomel, Belarus

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

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

Sergei 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

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

Alexander M. Malyarevich – Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

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

Oleg G. Penyazkov – A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute 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. Kheifetz – Institute of Applied Physics 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 – 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 – TU Wien, Wien, Austria
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 118, 220072, Minsk, Republic of Belarus.
Tel.: +375 17 374-02-45; e-mail: ftvesti@mail.ru
vestift.belnauka.by*

PROCEEDING OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS.

Physical-technical series, 2020, vol. 65, no. 3

Printed in Russian, Belarusian and English languages

Editor *I. A. Starostina*
Computer imposition *A. V. Novik*

It is sent of the press 21.09.2020. Appearance 29.09.2020. Format 60×84 1/8. Offset paper. The press digital.

Printed pages 14,88. Publisher's signatures 16,4. Circulation 72 copies. Order 165.

Number price: individual subscription – 12,32 byn., departmental subscription – 29,31 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, 2020

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

СОДЕРЖАНИЕ

К 60-ЛЕТИЮ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

- Кривонос О. К., Ильюшенко А. Ф., Петюшик Е. Е.** Контроль качества смешивания компонентов энерго-насыщенного гетерогенного композиционного материала *(на английском языке)* 263
- Ильюшенко А. Ф., Кривонос О. К., Петюшик Е. Е., Осипов В. А., Барай С. Г.** Материалы и технологии порошковой металлургии в компонентах авиационной и космической техники 272

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ

- Антонович Д. А., Груздев В. А., Залесский В. Г., Солдатенко П. Н.** Плазменный источник заряженных частиц для формирования совмещенных ионно-электронных пучков 285
- Шепелевич В. Г., Гусакова О. В., Гусакова С. В., Метто Е. С.** Структура и свойства быстрозатвердевающей фольги сплава Sn – 14 ат.% In – 6,5 ат.% Zn 292
- Азаров С. М., Балыдко Д. Н.** Формирование мембранного слоя с карбидом кремния на алюмосиликатной подложке 299

МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА

- Домасевич В. В., Ахметов Т. А., Кульгейко М. П.** Определение оптимальной силы контактного взаимодействия инструмента и детали при отделочно-упрочняющей обработке методом алмазного выглаживания 310

ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН

- Ахрамович А. П., Войтов И. В., Колос В. П.** Интеграция АЭС в экономику Республики Беларусь. Инфракрасная система АСЛОТУ 317
- Пантелеев С. В., Малашин А. Н., Каледа А. Е.** Разработка системы векторного управления полупроводникового преобразователя, обеспечивающей полигармонический режим работы многофазной электрической машины 332
- Василевич С. В., Малько М. В., Дегтерев Д. В., Асадчий А. Н.** Влияние давления газовой среды на образование древесного угля в процессе пиролиза растительной биомассы 341

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

- Асаёнок М. А., Зеневич А. О., Кочергина О. В., Новиков Е. В., Сорока С. А.** Работа кремниевых фотоэлектронных умножителей со структурой p^+-p-n^+ в режиме одноквантовой регистрации 349
- Тихончик С. С., Пучко Н. И.** Низконапорная форсунка с аэродинамическим распылом топлива 357
- Козерук А. С., Диас Гонсалес Р. О., Сухоцкий А. А., Филонова М. И.** Моделирование рабочей зоны обработки аксионов на технологическом оборудовании 365

ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ

- Гурский А. С., Ивашко В. С.** Использование транспортной телематики и дистанционной диагностики для совершенствования технического обслуживания и ремонта транспортных средств 375

CONTENTS**TO THE 60th ANNIVERSARY OF POWDER METALLURGY IN THE REPUBLIC OF BELARUS**

- Kryvanos A. K., Ilyushchanka A. Ph., Piatsiushyk Ya. Ya.** Quality control of mixing components of energy-saturated heterogeneous composite material 263
- Ilyushchanka A. Ph., Kryvanos A. K., Piatsiushyk Ya. Ya., Osipov V. A., Baray S. G.** Materials and technologies of powder metallurgy in components of aviation and space engineering 272

MATERIALS ENGINEERING, METALLURGY

- Antonovich D. A., Gruzdev V. A., Zalesski V. G., Soldatenko P. N.** Plasma source of charged particles for the formation of combined ion-electron beams 285
- Shepelevich V. G., Gusakova O. V., Gusakova S. V., Metto E. S.** Structure and properties of rapidly solidifying foils Sn – 14 at.% In – 6.5 at.% Zn 292
- Azarau S. M., Balydko D. N.** Formation of a membrane layer with silicon carbide on an aluminosilicate substrate 299

MECHANICAL ENGINEERING AND MECHANICS

- Domasevich V. V., Ahmetov T. A., Kulgeyko M. P.** Determination of the optimal strength of contact interaction of the tool and the part during finishing-hardening treatment by diamond smoothing 310

POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER

- Akhramovich A. P., Voitov I. V., Kolos V. P.** Integration of nuclear power station in the economy of Republic of Belarus. Infrared system ASLOTU 317
- Pantelev S. V., Malashin A. N., Kaleda A. E.** Development of a vector control system of the semiconductor converter, which will provide a polyharmonic operating mode of a polyphase electric machine 332
- Vasilevich S. V., Malko M. V., Degterov D. V., Asadchyi A. N.** Influence of gases pressure on the formation of charcoal in the process of pyrolysis of plant biomass 341

RADIOELECTRONICS AND INSTRUMENT-MAKING

- Asayonak M. A., Zenevich A. O., Kacharhina V. V., Novikau Y. V., Saroka S. A.** Operation of silicon photo-electronic multipliers with the structure p^+-p-n^+ in the single quantum registration mode 349
- Tihonchik S. S., Puchko N. I.** Low-pressure nozzle with aerodynamic fuel atomization 357
- Kozeruk A. S., Diaz Gonzalez R. O., Sukhotsky A. A., Philonova M. I.** Simulation of axicon processing area on technological equipment 365

DIAGNOSTICS AND SAFETY OF TECHNICAL AND ENVIRONMENT SYSTEMS

- Gurski A. S., Ivashko V. S.** Using transport telematics and remote diagnostics to improve vehicle maintenance and repair 375

К 60-ЛЕТИЮ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ
TO THE 60th ANNIVERSARY OF POWDER METALLURGY IN THE REPUBLIC OF BELARUS

UDC 621.454.3
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-263-271>

Received 07.08.2020
Поступила в редакцию 07.08.2020

Aleh K. Kryvanos, Aliaksandr Ph. Ilyushchanka, Yauheni Ya. Piatsiushyk

State Research and Production Powder Metallurgy Association, Minsk, Republic of Belarus

**QUALITY CONTROL OF MIXING COMPONENTS OF ENERGY-SATURATED
HETEROGENEOUS COMPOSITE MATERIAL**

Abstract. Methods of direct and indirect assessment of the quality of mixing dispersed solid-phase components in a liquid polymer binder are considered. It is shown that a number of methods for the quantitative estimation of mixing (associated with the extraction of solid-phase components), which have been developed in other areas of the technology of materials, are not suitable for controlling an energy-saturated heterogeneous composite material (EHCM). An experimental method revealed the criteria values (a range) of the EHCM density and determined the main groups of the EHCM characteristics, ensuring their acceptable operational properties. By means of modern research equipment using proven methods, a series of studies was carried out to establish the uniformity of the distribution of particles of solid-phase components in the EHCM, the presence, the shape, sizes and distribution in the volume of defects in the structure of the material, the physicochemical properties of the EHCM after polymerization. According to a comparison of the results of instrumental determination of the main characteristics of the EHCM (structural, physical) with the operational properties of the material, depending on the duration of the mixing process on a specific equipment under otherwise equal conditions, it was found that for the successful solution of technological tasks it is acceptable to assess indirectly the quality of mixing according to the results of density determination of the EHCM after its polymerization. This can provide operational output quality control of the final product that does not require significant material and time costs during the development of technological processes and during the production of the EHCM.

Keywords: energy-saturated heterogeneous composite materials, components, mixing quality, control, research methods, assessment criteria

For citation: Kryvanos A. K., Ilyushchanka A. Ph., Piatsiushyk Ya. Ya. Quality control of mixing the components of an energy-saturated heterogeneous composite material. *Vestsi Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 3, pp. 263–271. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-263-271>

О. К. Кривонос, А. Ф. Ильющенко, Е. Е. Петюшик

Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии, Минск, Республика Беларусь

**КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СМЕШИВАНИЯ КОМПОНЕНТОВ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННОГО ГЕТЕРОГЕННОГО
КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА**

Аннотация. Рассмотрены способы непосредственной и косвенной оценки качества смешивания дисперсных твердофазных компонентов в жидком полимерном связующем. Показано, что ряд получивших развитие в других областях технологии материалов способов количественной оценки смешивания (связанных с экстракцией твердофазных компонентов), не пригоден для контроля энергонасыщенного гетерогенного композиционного материала (ЭГКМ). Экспериментальным способом выявлены критериальные значения (диапазон) плотности ЭГКМ и определены основные группы характеристик ЭГКМ, обеспечивающих приемлемые эксплуатационные свойства данного материала. С использованием современного оборудования по апробированным методикам проведен комплекс исследований по установлению степени равномерности распределения в ЭГКМ частиц твердофазных компонентов,

наличия, формы, размеров и распределения в объеме дефектов структуры материала, физико-механических свойств ЭГКМ после полимеризации. На основе сопоставления результатов инструментального определения основных характеристик ЭГКМ (структурных, физических) с эксплуатационными свойствами материала в зависимости от длительности процесса смешивания на конкретном оборудовании при прочих равных условиях установлено, что для успешного решения технологических задач приемлемым является способ косвенной оценки качества смешивания по итогам определения плотности ЭГКМ после его полимеризации. Этим может быть обеспечен оперативный выходной контроль качества конечного продукта, не требующий значительных материальных и временных затрат, при разработке технологических процессов и в ходе производства ЭГКМ.

Ключевые слова: энергонасыщенные гетерогенные композиционные материалы, компоненты, качество смешивания, контроль, методы исследования, критерии оценки

Для цитирования: Кривонос, О.К. Контроль качества смешивания компонентов энергонасыщенного гетерогенного композиционного материала / О.К. Кривонос, А.Ф. Ильющенко, Е.Е. Петюшик // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, №3. – С. 263–271. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-263-271>

Introduction. Energy-saturated heterogeneous composite materials (EHCMs), used as an energy source in technical systems operating on jet thrust, are produced by mixing polydisperse particles of solid-phase components in one or more liquid-phase binders. After mixing all the components of EHCM, the resulting composition is formed and its liquid phase is polymerized. Changing the performance characteristics of the product produced after polymerization becomes impossible (except for adjusting the size and shape).

Therefore, mixing of the components is one of the most critical technological operations in the general diagram for producing EHCM, which determines the quality of the final product. This circumstance makes it necessary to control the quality of mixing of EHCM components.

Formulation of the research task. For the production of EHCM, solid-phase powder components chosen in accordance with the approaches described in [1] are introduced into the composition of the polymer binder in a certain sequence. In order to obtain the densest packing of particles of these components, as a rule, fractions of various sizes are selected, forming a structure with minimal cavities during mixing [2], which are filled with a liquid-phase binder.

Much attention is paid to the quality of mixing powder solid-phase components in powder metallurgy, pharmaceuticals, agriculture, construction and other industries, where the preparation of structurally similar composite systems is carried out. In these industries, appropriate methods for controlling the uniformity of mixing of components have been introduced into the production process [3, 4]. The main part of these methods involves the use of various instrumental methods for separating fractions or components of a mixture according to their characteristic features and assessing the number of each of them in the selected sample.

Due to the presence of a polymer in the composition of EHCM, which is a liquid phase at the mixing stage, the research results carried out in Ref. [3, 4] cannot be fully used to assess the uniformity of the distribution of solid-phase components. Mixing of a polymer with polydisperse particles of a solid phase, which are introduced to strengthen it, is carried out in the construction, machine, tractor, aircraft and other industries to produce polymer-based construction materials. The mixing process of such materials was investigated in Ref. [5, 6, etc.]. Most of the traditionally used methods for assessing the quality of mixing the components of a highly filled polymer involve the burning of the binder component or the extraction of solid phase components, followed by a quantitative assessment of the extracted powder materials. The use of such methods in the technology for producing EHCM is impossible due to the reactive nature of some of its components, which are prone to chemical decomposition at relatively low temperatures ($t > 150$ °C). This can cause uncontrolled combustion of the mixed mass.

The use of methods for non-destructive control of polymer-based composite materials, considered in Ref. [7], requires their adaptation due to the increased reactivity of EHCM and the peculiarities of the technological stages of its production. Also, for the application of non-destructive control methods, a statistical database is needed to compare the results obtained with the one already available in it. Taking into account the foregoing, the task of the study is to select methods for assessing the quality of mixing of EHCM components, determine the algorithms for their application, verify these methods using the example of the existing technology for producing EHCM, formalize the input data and the resulting final values, as well as develop rules for interpreting the results obtained.

Research materials and discussion. To conduct a study and determine approaches to control the quality of mixing in accordance with the thermodynamic calculations carried out in Ref. [1], the composition of EHCM was chosen, in which the liquid phase is 14 wt.%. The solid phase is particles of micro- and nano-size. For a visual representation of the objective function of the process of mixing the components of EHCM in Ref. [8], a geometric model of a unit cell with a coordination number of 12 was developed, which is formed with a hexagonal dense packing of solid phase particles. When developing this model, in order to achieve the densest packing of the oxidant particle (the main component of the solid phase), two fractions were picked up, the median sizes of which were 240 and 50 μm .

Taking into account the characteristics of the unit cell in Ref. [1], the calculated values of the mixing quality of the EHCM components were determined, which are subsequently used for instrumental control at all stages of its production. Based on the results obtained in the course of calculations and modeling, the input requirements for the EHCM components are formulated, in accordance with which they are selected and the following characteristics are controlled:

- the chemical composition of the components, which determines the required stoichiometry;
- particle size distribution and morphological properties of powder components;
- physicochemical properties of the polymer binder (molecular weight, number of functional groups, viscosity, moisture, and etc.).

After analyzing the measurements of the characteristics of the EHCM components, some operating modes of the technological equipment or the sequence of technological operations of the mixing process can be refined.

In the course of mixing the components of EHCM, a complex of tasks is solved. According to the results its operational properties are formed. First of all, these tasks are following [1]:

- achieving a uniform distribution over the volume of EHCM of all solid-phase components and preparation of a homogeneous composition;

- obtaining the densest packing of particles of the solid phase due to their rational distribution in the volume of EHCM, depending on the linear dimensions and properties;

- filling cavities formed in the packing of particles of solid-phase components with a liquid polymer binder;

- wetting the entire surface of the solid-phase particles with liquid-phase components.

Due to the uniform distribution of the components, the stability of the performance characteristics of the product made of EHCM is achieved, and, accordingly, the stability of technical system that includes this product. The absence of cavities in the packing of particles of solid-phase components reduces the probability of an uncontrolled increase in the area of combustion of EHCM, and the densest packing gives the best value of the energy properties per unit volume of the resulting composite material. By wetting the entire surface of the particles, the formation of a structure-forming matrix with the required value of adhesion strength is achieved, which provides the specified physical and mechanical properties for the EHCM product.

Taking into account the importance of each of the above tasks in the formation of the operational properties of EHCM in Ref. [1], the characteristics were investigated and evaluation criteria were proposed that determine the degree of their fulfillment. These characteristics include:

- the degree of uniformity of particle distribution of solid-phase components in EHCM;

- absence/presence of cavities in the EHCM product, their sizes, shapes and volume distribution;

- the density of the resulting EHCM;

- physical and mechanical properties of EHCM after polymerization.

Their measurement is carried out taking into account the physicochemical properties of the components and EHCM as a whole, typical for each stage of the technological process of its production.

Experimental set up and analysis of results. To determine the methods of studying the properties that characterize the degree of fulfillment of mixing tasks, an experimental composition of EHCM was produced. In the process of its production, the results of producing EHCM at each of the technological stages were investigated and the methods of their control were considered. Production technology of the experimental composition, due to the presence of nanoscale antioxidant powders in the composition of solid-phase components, assumed the production of EHCM in two stages.

Dynamics of surface area

Component	Specific surface area, m ² /g	Weight, kg	Total surface area, m ²
<i>Before adhesive deposition</i>			
Oxidizing agent (large fraction)	0.425	2.985	1417.9
Anti-oxidizing agent	430	0.015	6450
<i>After 2 h of adhesive deposition</i>			
Oxidizing agent (large fraction) with deposited anti-oxidizing agent	2.17	3	6491
<i>After 4 h of adhesive deposition</i>			
Oxidizing agent (large fraction) with deposited anti-oxidizing agent	1.965	3	5868

To assess the uniformity of distribution, collection of samples was carried out from time to time and changes in the surface area of the interacting particles were analyzed. The assessment of changes was carried out by measuring the specific surface area and calculating the surface area of the particles intended for subsequent wetting with a liquid-phase binder. The specific surface area was measured by the BET method on SA 3100 surface area and pore size analyzer (Beckman Coulter, Inc., USA). The results of measuring the specific surface area and total area of the particles of the selected samples of the oxidizing agent (large fraction) and anti-oxidizing agent before deposition, after 2 h and 4 h of deposition are presented in Table.

The results were evaluated taking into account changes in the surface morphology of large fraction particles of the oxidizing agent. The surface morphology was surveyed using high-resolution scanning electron microscope Mira (Tescan, Czech Republic). Thus, the results of the morphological analysis of the surface of the large fraction particles of the oxidizing agent before deposition (Fig. 1, *a*), after 2 h and 4 h of deposition of the anti-oxidant particles are shown in Fig. 1.

The analysis results showed that after two hours of adhesive deposition, the total surface area of the particles decreased by 17.5 %. At the same time, during the study of the surface morphology of the oxidant particles, the presence of agglomerates (Fig. 1, *b*) of the anti-oxidizing agent on their surface was revealed. Taking into account the obtained values, the process of mechanical impact on the deposited surface and nanoscale anti-oxidant particles continued until their relatively uniform distribution was obtained. Thus, over the next 2 h, the total surface area of the particles decreased by another 6.7 %, and a more uniform distribution of anti-oxidant particles over the deposited surface was obtained (Fig. 1, *c*).

At the second stage, solid-phase powder components were mixed in the medium of a polymer binder, including powders of the large fraction of the ammonium salt of perchloric acid, with nanoscale anti-oxidant particles deposited on the surface of their particles. The components were mixed in SP-15 plane-

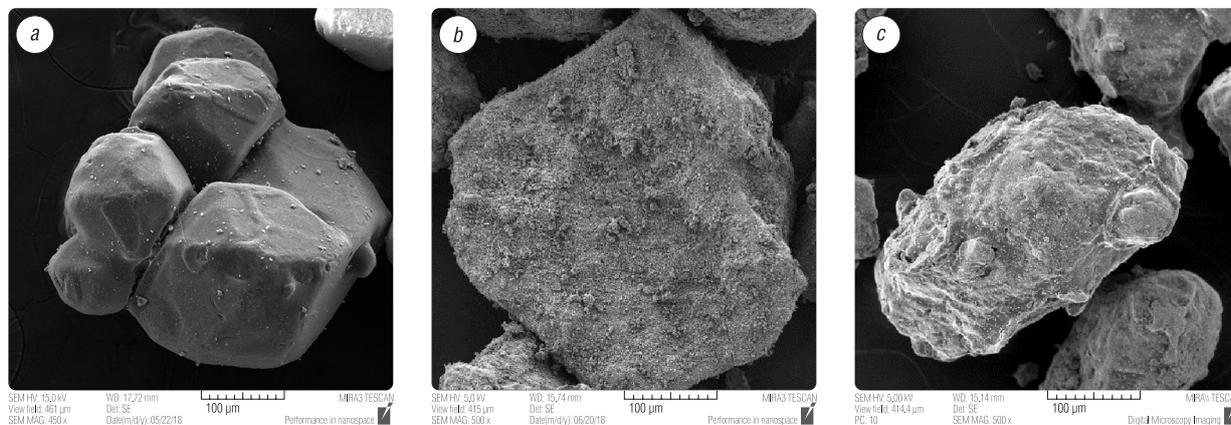


Fig. 1. The results of morphological analysis of the surface of the large fraction particles of the oxidizing agent: *a* – before the deposition of nanoscale additives, *b* – after 2 h of operation of the technological equipment, *c* – after 4 h (completion of adhesive deposition) of operation of the technological equipment

At the first stage, the preparation of powder components was carried out, during which nanoscale components (anti-oxidizing agent) from an alcohol suspension were deposited onto the surface of particles of the large fraction of the oxidizing agent (240 µm). The deposition of nanoscale particles was carried out in accordance with the technology described in Ref. [9]. In the course of deposition, the uniformity of the distribution of nanoscale components on the surface of the large fraction particles of the ammonium salt of perchloric acid and the change in the surface area of the particles of the mixed EHCM components were studied.

tary mixer (Russian Federation) with two mixers. The mixing bowl diameter is 335 mm and the working volume is 2.375 l. During mixing, the uniformity of the distribution of components in the volume of the EHCM was assessed by sampling, polymerization of the liquid-phase binder, and evaluation of:

- the formed structure and homogeneity of EHCM afterwards;
- density of the produced EHCM and its compliance with the calculated value;
- physical and mechanical properties of the material.

To study the structure formed during mixing, samples were taken at intervals of 5 min. Further mixing was resumed after setting up the required pressure and temperature in the mixer bowl. After polymerization of the binder, the selected samples were subjected to fracture along the cross section and application of a conductive coating. The conductive layer on the fracture surface was applied by cathode spraying of chromium in a vacuum, and the coating thickness required for contrast was formed for 10 s of deposition.

The morphology of the samples was studied using high-resolution scanning electron microscope Mira (Tescan, Czech Republic). The accelerating voltage during the survey was 15 kV. The results of the morphological analysis of the composition obtained at various stages of mixing the components are shown in Fig. 2.

According to the results of the morphological analysis of the samples taken in the 5th minute, the presence of large (significantly larger than the particle size of powder components) cavities in their structure was determined (Fig. 2, *a*). With further mixing, an ordered structure of EHCM is formed due to a denser packing of particles of powder components and filling the cavities with the polymer binder

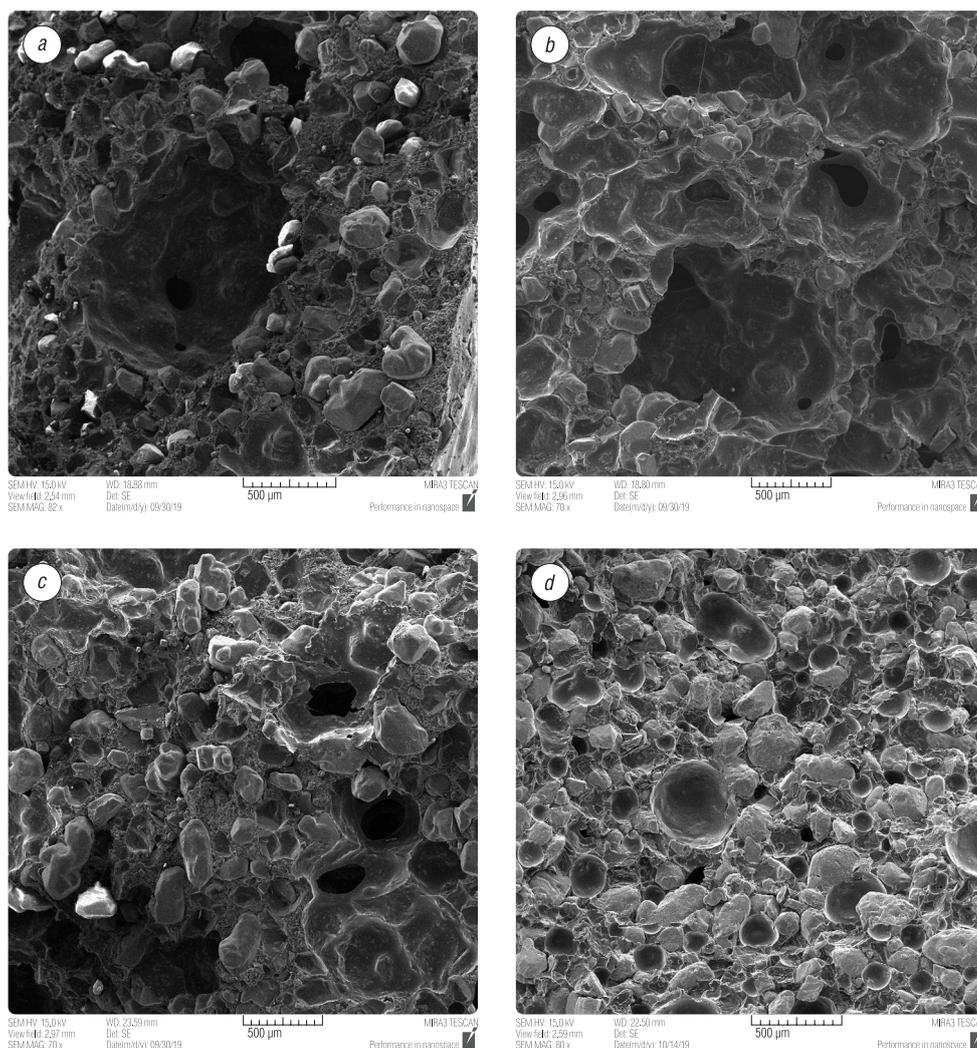


Fig. 2. Morphology of the fracture surface of polymerized EHCM samples: *a* – after 5 min of mixing, *b* – after 10 min of mixing, *c* – after 15 min of mixing, *d* – after 20 min of mixing

(Figs. 2, *a–c*). The best value is typical for a sample taken in the 20th minute of mixing (Fig. 2, *d*). Further mixing of the components after the ordered structuring of the EHCM led to an increase in the load on the rotating blades of the mixing equipment (it was characterized by an increase in the power output at the drive) and the destruction of particles. The morphological analysis of a sample taken in 25th minute of mixing the components revealed the presence of destruction of large fraction particles of powder components in the composition of the material. The processes (wetting, cladding, rearrangement of particles, adhesive interaction, etc.) occurring with continued mixing after the formation of a relatively ordered structure of EHCM (after 20–22 min) require additional research.

According to the results of morphological analysis, it was found that for the selected mixing equipment and the composition under consideration, mixed at a temperature in the mixing chamber $T = 303\text{--}308\text{ K}$, a pressure in the bowl $P = 0.075\text{ MPa}$, and a blade rotation speed 20 rpm, the most preferred mixing time is in the interval of 20–22 min.

Along with the morphological analysis of structure formation during the second stage of producing EHCM, the dynamics of changes in the density of the material, resulted at various stages of mixing the components, was investigated. The EHCM components were mixed for 32 min. Sampling was performed every 2 min of mixing. The other conditions and operating modes of the mixing equipment were identical to those described above when carrying out morphological analysis. The density of the samples was measured with a PZh-2 pycnometer. The dynamics of the change in the density of the material with the mixing of the EHCM components with the approximation reliability $R^2 = 0.9976$ is shown in Fig. 3.

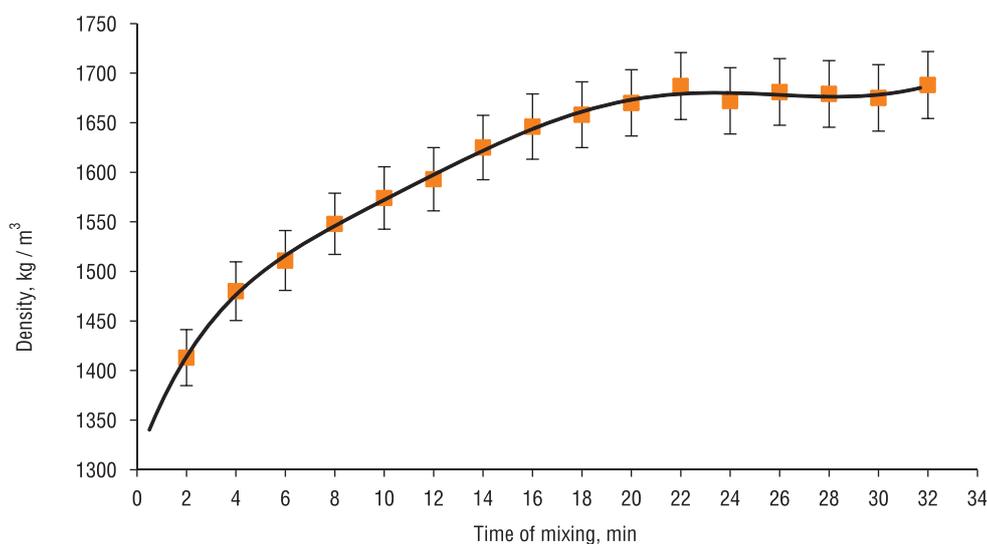


Fig. 3. Dynamics of the EHCM density during mixing of the components

It was found that the best value of the density (1687 kg/m^3 , which is 0.97 of the calculated one) of the experimental EHCM was achieved at the 22d minute of mixing its components. As can be seen from the diagram, further mixing of the components does not give a significant increase in density. In this regard, the most preferred mixing time of the EHCM components was determined, which was 22 min.

Relatively identical results of the most preferred mixing time under the specified operating modes of the technological equipment confirmed the possibility of using both control methods (study of the morphology of the fracture surface of the material sample and the material density) for assessing the mixing quality. At the same time, a method that evaluates the quality of mixing by measuring the density of a sample is more accurate, since it can quantify the measured property. Also, the assessment of the quality of mixing by measuring the achieved density of EHCM is a less costly method of control, since it does not imply the obligatory production of a witness sample, which must subsequently be disposed of in the prescribed manner. However, within the framework of adapting this method for the production of specific products, it is necessary to determine the evaluation criteria. The comparison of the measured density values will make it possible for the manufacturer to decide on the quality of the produced EHCM.

To study homogeneity and establish criteria for assessing the quality of mixing of EHCM components, X-ray control of produced samples with different relative densities was carried out. X-ray control was carried out using ERESKO MF4 X-ray generator (Germany) at a voltage and current on an X-ray tube of 65 kV and 1.0 mA, respectively; a focal distance is 1000 mm and an exposure time is 0.5 s.

In the course of the radiographic analysis of samples taken from the 18th to 22d minute with a relative density of $\vartheta = 0.95\text{--}0.97$, the homogeneity of the structure of the resulting EHCM was confirmed. The results of radiographic analysis for the sample with $\vartheta = 0.95$ are shown in Fig. 4.

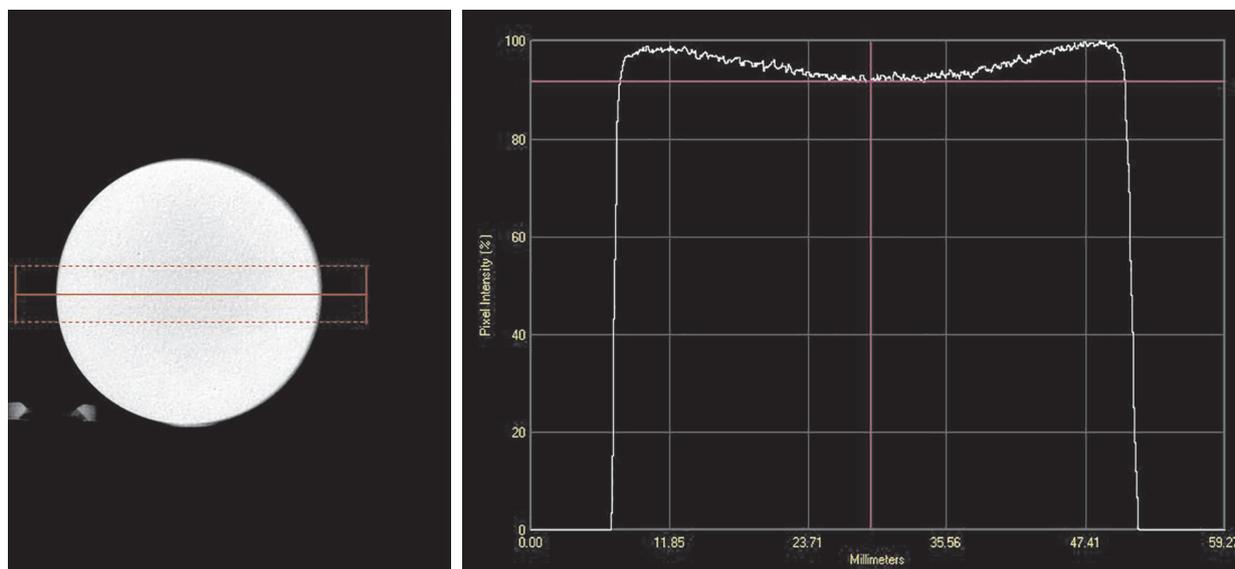


Fig. 4. Radiographic image of the EHCM sample with a relative density of $\vartheta = 0.95$

The deviations of the intensity of the measured product transmitted radiation throughout the entire cross section due to the different density were within the normal range. This confirmed the conclusion about the suitability of the resulting EHCM for operation as part of a technical system.

The study of the homogeneity of the samples taken in the 14th and 16th, as well as 24th and 26th minutes of mixing, revealed the presence of defects in the EHCM structure. The most typical examples for defects of this group of EHCM samples are shown in Fig. 5.

The reasons for the appearance of such defects can be insufficient wetting of the surface of the particles of solid-phase components with a liquid polymer binder, whereby the required contact area and, accordingly, the adhesive interaction at the phase boundary are not provided. Further mixing of the components allows such defects to be minimized. The second group of defects, which is most typical for samples taken in 24th and 26th minutes of mixing, may be a consequence of an increase in the shear stress typical for a dilatant fluid [10]. It is assumed that for this reason, the particles of the powder components are destroyed and rearranged.

To confirm the effect of the homogeneity of the EHCM structure on its operational properties, the strength and energy characteristics of the selected samples were measured. The strength of the samples was investigated in accordance with GOST 11 262-2017 (ISO 527-2:2012) "Plastics. Tensile test method". During the tests, it was found that the samples with a relative density of $\vartheta = 0.95\text{--}0.97$ showed a result that meets the requirements (tensile strength $\sigma_p = 4\text{--}10$ MPa; relative elongation $\varepsilon = 5\text{--}10$ %). Specimens made of EHCM taken in 14th and 16th, as well as 24th and 26th minutes and having hidden structural defects, corresponded in 50 % of cases to the lower limit of the specified range of admissible strength values, and the rest was destroyed at loads significantly lower than the lower threshold value.

The second group of operational properties, involving the use of EHCM products as part of a technical system, was studied on a stand that simulates the real conditions of its operation. In order to eliminate the probability of destruction of the technical system, samples made of EHCM after 14th and 16th, as well as 24th and 26th minutes as part of the technical system were not tested. The reasons for the occurrence and the nature of various defects in the operation of a technical system, which includes an

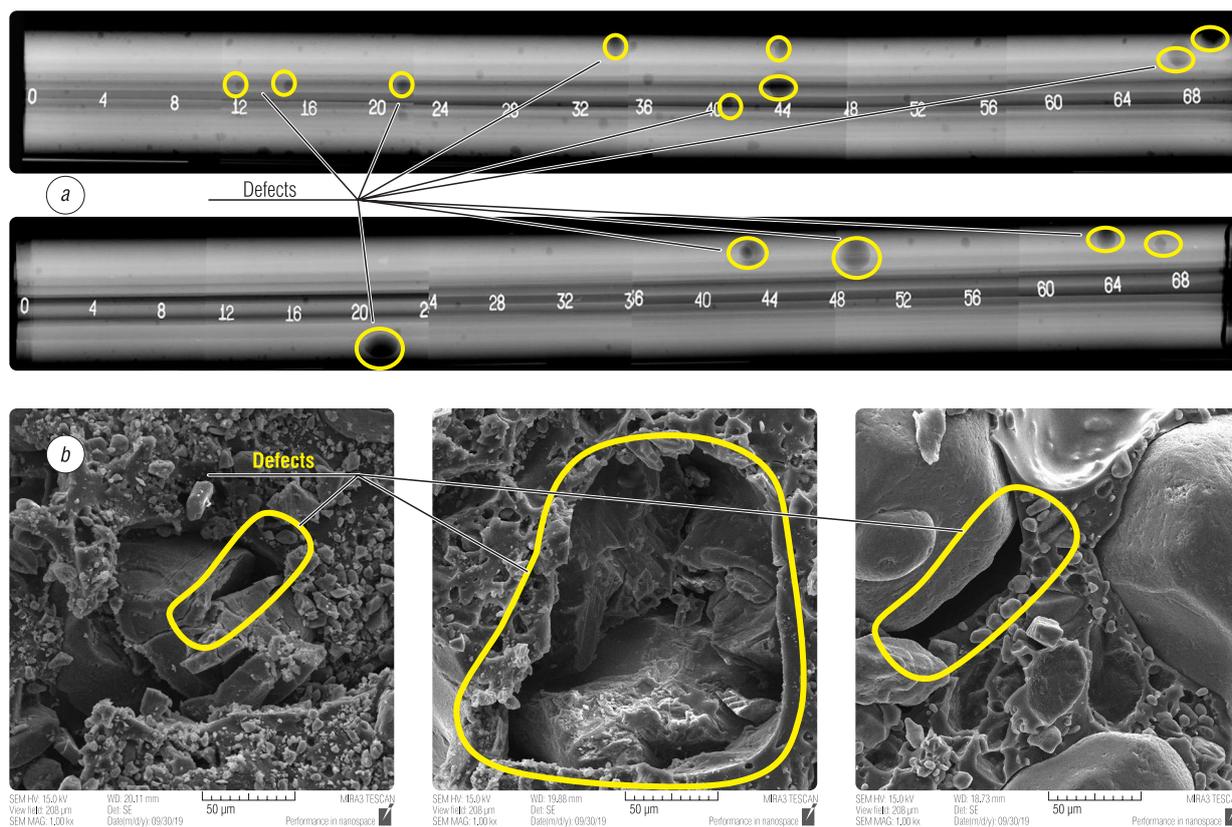


Fig. 5. Examples of defects in EHCM samples taken in 14th and 16th minute, as well as in 24th and 26th minute of mixing: *a* – the signs of lack of homogeneity and the presence of hidden defects in the product made of EHCM, *b* – the most characteristic hidden defects in the structure of EHCM (cavities formed as a result of the destruction of large fractions of the oxidizing agent, the absence of adhesion between the surface of the particles of solid-phase components and the polymer material)

EHCM product, requires additional research. Testing of products made of EHCM with a relative density of $\vartheta = 0.95–0.97$, as part of a technical system, confirmed their compliance with the requirements.

Taking into account the results obtained in the course of the study, it was shown that the density of EHCM is the most representative property characterizing the quality of mixing of its components and the formation of an ordered structure. In this case, the criterion value characterizing the degree of achievement of the required mixing quality is the relative density of the material. Its value should be in the range of $0.95 \leq \vartheta \leq 1$.

Conclusion. The paper defines the main properties of EHCM, which characterize the mixing quality of its components. Taking into account the approaches in other industries, the possibility of applying the methods used to control these properties is assessed. According to the results of the assessment, it was determined that the density of EHCM can be considered as the most representative property characterizing the quality of mixing of EHCM components. The efficiency of this choice is confirmed by the example of the manufacture of an experimental EHCM composition by other instrumental control methods. The methods of interpretation of the obtained research results have been experimentally run out. The use of instrumental control methods contributed to the optimization of technological operation modes of mixing equipment for EHCM manufacture.

An evaluation criterion has been run out to control the quality of mixing of EHCM components by analyzing the relative density of the material. The feasibility of the defined value of the mixing quality evaluation criterion is confirmed by strength and full-scale tests. It was found that going beyond the limits of the material density evaluation criterion indicates the presence of defects in the structure of the EHCM product. The possibility of using EHCM with a density lower than the defined value requires additional research.

Thus, the proposed approach to assessing the relative density of the produced material and the proposed interpretation of the results of its use makes it possible to exclude the use of a product with internal defects and thereby ensure the required quality of the sample as a whole.

References

1. Kryvanos A. K., Ilyushchanka A. Ph., Piatsiushyk Ya. Ya., Prokhorov M. U. The choice of criteria for assessing the quality of mixing the components of an energy-saturated heterogeneous composite material. *Poroshkovaya metallurgiya: respublikanskiy mezhvedomstvennyi sbornik nauchnykh trudov* [Powder Metallurgy: Republican Interdepartmental Collection of Scientific Papers]. Minsk, National Academy of Sciences of Belarus, 2019. Issue 42, pp. 194–199 (in Russian).
2. Ilyushchanka A. Ph., Kryvanos A. K., Piatsiushyk Ya. Ya., Smirnov G. V. Increasing the packing density of the solid phase of a heterogeneous composite material. The major problems and their solutions. *Poroshkovaya metallurgiya: respublikanskiy mezhvedomstvennyi sbornik nauchnykh trudov* [Powder Metallurgy: Republican Interdepartmental Collection of Scientific Papers]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2017. Issue 40, pp. 42–47 (in Russian).
3. Kafarov V. V., Dorokhov I. N., Arutyunov S. Y. *System Analysis of Chemical Technology Processes: Grinding and Mixing*. Moscow, Yurait Publ. House, 2018. 440 p. (in Russian).
4. Selivanov Yu. T., Polyakov B. E. Optimization of Preparation of Multicomponent Mixtures in Circulating Mixers. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transactions of Tver State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 2, pp. 312–321 (in Russian). <https://doi.org/10.17277/vestnik.2015.02.pp.312-321>
5. Erenkov O. Y., Koval'chuk S. A. *Innovative Technologies of Polymer Composite Materials*. Khabarovsk, Publ. House of the Pacific State University, 2016. 187 p. (in Russian).
6. Bobryshev A. N., Erofeev V. T., Kozomazov V. N. *Polymer Composite Materials: Teaching Medium*. Moscow, Publ. House ASV, 2013. 480 p. (in Russian).
7. Boitsov B. V., Vasil'ev S. L., Gromashev A. G., Yurgenson S. A. Non-destructive testing methods used for PCM constructions. *Trudy MAI*, 2011, no. 49. Available at: http://trudymai.ru/published.php?ID=28061&PAGEN_2=2 (accessed 12 November 2019) (in Russian).
8. Ilyushchanka A. Ph., Buloichyk V. M., Kryvanos A. K., Piatsiushyk Ya. Ya. Formalization of the process and development of an algorithm for solid-phase mixing of components of a heterogeneous composite material. *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. 263–270 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-3-263-270>
9. Ilyushchanka A. Ph., Piatsiushyk Ya. Ya., Kryvanos A. K. Introduction of nanoscale additives in the process of modification of energy-saturated heterogeneous composite material. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2019, vol. 64, no. 2, pp. 135–142 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-2-135-142>
10. Strenk F. *Mixing and Equipment with Mixers*. Leningrad, Khimiya Publ., 1975. 384 p. (in Russian).

Information about the authors

Aleh K. Kryvanos – Ph. D. (Military Science), Associate Professor, Deputy of Director General, State Research and Production Powder Metallurgy Association (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Krivonos_ok@tut.by

Aliaksandr Ph. Ilyushchanka – Correspondent Member of the National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Engineering), Professor, Director General of the State Research and Production Powder Metallurgy Association – Director of O. V. Roman Powder Metallurgy Institute, State Research and Production Powder Metallurgy Association (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alexil@mail.belpak.by

Yauheni Y. Piatsiushyk – D. Sc. (Engineering), Professor, Deputy of Director General for Research Work, State Research and Production Powder Metallurgy Association (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pet65@bk.ru

Информация об авторах

Кривонос Олег Константинович – кандидат военных наук, доцент, заместитель генерального директора, Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: Krivonos_ok@tut.by

Ильющенко Александр Федорович – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, генеральный директор Государственного научно-производственного объединения порошковой металлургии – директор Института порошковой металлургии имени академика О. В. Романа, Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: alexil@mail.belpak.by

Петюшик Евгений Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора по научной работе, Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: pet65@bk.ru

А. Ф. Ильющенко^{1,2}, О. К. Кривонос¹, Е. Е. Петюшик¹, В. А. Осипов², С. Г. Барай²

¹*Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии, Минск, Республика Беларусь*

²*Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа, Минск, Республика Беларусь*

МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ В КОМПОНЕНТАХ АВИАЦИОННОЙ И КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Аннотация. Рассмотрены примеры реализации способов порошковой металлургии и их отдельных элементов в процессах получения материалов со специальными свойствами и изделий из них. Показана возможность и оценены результаты получения радиопоглощающих и радиопрозрачных материалов в виде сплошных тел и покрытий. Дополнение традиционных для порошковой металлургии технологических переходов, обеспечивающих в целом производство радиопрозрачных материалов, процессами механоактивированного синтеза и механоактивированного самораспространяющегося высокотемпературного синтеза на стадиях подготовки порошков к формованию позволяет осуществить переход к получению радиопоглощающих материалов. Высокая эффективность радиопрозрачных и радиопоглощающих материалов подтверждена экспериментально. Переход от однокомпонентного состава исходной шихты через формирование фазового состава материала за счет включения в перемешиваемую шихту порошковых компонентов, состав и кристаллическое строение которых остаются неизменными на всех этапах его получения, к синтезу требуемого фазового состава за счет взаимодействия порошковых компонентов на одной из стадий технологического передела позволяет получать, например, карбидокремниевую керамику непосредственно в практически полезных изделиях, в частности в подложках оптических зеркал для дистанционного зондирования Земли. Разработанные в порошковой металлургии технологические операции стали основой для получения энергонасыщенных гетерогенных композиционных материалов. Активно развивающиеся аддитивные технологии как относительно новая ветвь порошковой металлургии расширяют ее возможности до практически необозримых пределов.

Ключевые слова: порошковая металлургия, аддитивная технология, синтез, реакционное спекание, функциональный материал, авиакосмическая техника

Для цитирования: *Материалы и технологии порошковой металлургии в компонентах авиационной и космической техники / А. Ф. Ильющенко [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, № 3. – С. 272–284. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-272-284>*

Aliaksandr Ph. Ilyushchanka^{1,2}, Aleh K. Kryvanos¹, Yauheni Ya. Piatsiushyk¹, Vladimir A. Osipov², Sergey G. Baray²

¹*State Research and Production Powder Metallurgy Association, Minsk, Republic of Belarus*

²*O. V. Roman Powder Metallurgy Institute, Minsk, Republic of Belarus*

MATERIALS AND TECHNOLOGIES OF POWDER METALLURGY IN COMPONENTS OF AVIATION AND SPACE ENGINEERING

Abstract. Examples of the implementation of powder metallurgy methods and their individual elements in the processes of producing materials with special properties and products thereof are considered. The possibility is shown and the results of producing radar-absorbing and radar-transparent materials in the form of solid bodies and coatings are evaluated. The addition of technological transitions, traditional for powder metallurgy, providing in general the production of radar-transparent materials, with the processes of mechanically activated synthesis and mechanically activated self-propagating high-temperature synthesis at the stages of preparing powders for molding, makes it possible to make the transition to the production of radar-absorbing materials. The high efficiency of both has been confirmed experimentally. The transition from a single-component composition of the initial charge mixture through the formation of the phase composition of the material due to the inclusion of powder components into the mixed charge, the composition and crystal structure of which remain unchanged at all stages of its preparation, to the synthesis of the required phase composition due to the interaction of powder components at one of the stages of technological conversion makes it possible to synthesize, for example, silicon carbide ceramics directly in practically useful products, particularly, substrates of optical mirrors for remote sensing of the Earth. The technological operations developed in powder metallurgy have become a background for the production of energy-saturated heterogeneous composite materials. Actively developing additive technologies, as a relatively new branch of powder metallurgy, expands its capabilities practically boundless.

Keywords: powder metallurgy, additive technology, synthesis, reaction sintering, functional material, aerospace engineering

For citation: Ilyushchanka A. Ph., Kryvanos A. K., Piatsiushyk Ya. Ya., Osipov V. A., Baray S. G. Materials and technologies of powder metallurgy in components of aviation and space engineering. *Vesti Natsyyanal'nei akademii nauk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 3, pp. 272–284 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-272-284>

Введение. Технология получения металлических порошков и изготовления изделий из них зародилась еще в период древнеегипетской цивилизации (около III в. до н.э.), однако широкое применение в качестве метода промышленного производства изделий получила только в XIX в. На территории современной Республики Беларусь порошковая металлургия начала развиваться с середины XX в. Официальную дату рождения этой области науки и техники в Беларуси (23 сентября 1960 г.) связывают с созданием Центральной базовой лаборатории в Белорусском политехническом институте [1]. За прошедшие 60 лет порошковая металлургия Беларуси прошла достаточно продуктивный путь своего становления и развития, трансформировавшись из научного направления деятельности научно-исследовательской лаборатории в самостоятельное научно-технологическое направление.

В настоящее время технология порошковой металлургии является одним из основных, а в некоторых случаях единственным методом при получении композиционных материалов с уникальным комплексом свойств. Основные преимущества технологии заключаются в возможности конструировать материалы с заданным комплексом свойств за счет варьирования их состава – легирования и введения элементов, которые невозможно ввести при традиционном методе металлургии – плавке, а также в получении изделий без или с минимальной механической доработкой.

Благодаря сочетанию физико-механических и функциональных свойств порошковые материалы широко применяются в аэрокосмической и оборонной промышленности, так как изделия, изготовленные на их основе, способны работать в течение длительного периода времени в условиях высоких температур, давлений и агрессивных сред, а также при воздействии факторов аэрокосмического пространства. К таким материалам можно отнести [1]:

псевдосплавы на основе вольфрама или железа;

оксидную и карбидную керамику, а также композиционные материалы на их основе;

твердые сплавы;

антифрикционные и фрикционные композиционные материалы на основе железа или меди с функциональными добавками различной природы (карбиды, оксиды, нитриды, интерметаллиды, и др.) и твердыми смазками (графит, сульфиды, силициды и др.);

электротехнические композиционные материалы;

порошковые композиционные материалы для нанесения функциональных покрытий;

композиционные порошки на металлической, керамической основе, интерметаллиды и многое другое.

Получение этих материалов с требуемыми свойствами достигается за счет возможности регулирования их структурного и фазового состава, синтеза частиц исходных компонентов необходимых фракций с требуемой морфологией их поверхности, подбора наиболее целесообразного фракционного состава частиц, плотности получаемого материала, оптимизации режимов перемешивания порошковых компонентов, что для традиционных промышленных технологий остается трудновыполнимым или вовсе невозможным. Подбор компонентов порошковой шихты с требуемыми характеристиками, ее формование и спекание при определенных давлениях и температурах (как правило, ниже точки плавления основного компонента) позволяет получить материалы с уникальными свойствами [2]. При этом обеспечивается не только стойкость к агрессивной среде, но и заранее заданный уровень функциональных свойств, который сохраняется в течение всего срока эксплуатации изделия, изготовленного из такого материала. Характерным примером таких результатов являются радиопоглощающие и радиопрозрачные материалы, из которых изготовлены отдельные узлы и агрегаты современной авиационной и космической техники.

Получение радиопрозрачных и радиопоглощающих материалов. Радиопрозрачные материалы используют при производстве антенных обтекателей самолетов и узлов ракет для их защиты от агрессивных факторов аэрокосмического пространства (аэродинамических и тепловых нагрузок и ударов, дождевой, пылевой, газовой эрозии и ионизирующих излучений и др.). При этом изделия из таких материалов не должны препятствовать прохождению электромагнитных волн, излучаемых и принимаемых антенным устройством. В свою очередь радиопоглощающие материалы предназначены для снижения отражающей способности электромагнитного излучения узлами и агрегатами самолетов и ракет и, таким образом, снижения их заметности.

В Институте порошковой металлургии имени академика О. В. Романа проводят комплексные исследования по разработке и изготовлению керамических радиопоглощающих и радиопрозрачных материалов для микроволнового диапазона частот излучения. Основной целью этих работ является определение составов и технологических режимов подготовки порошковых компонентов и получение названных материалов, а также изделий и покрытий из них, имеющих необходимые электрофизические и термомеханические свойства.

Основу современных радиопрозрачных материалов составляют различные диэлектрические пластические массы, керамика: плавный кварц, ситаллы и другие, подходящие по своим свойствам композиты [3]. Для получения радиопрозрачных материалов исследовали композиции на основе высокоглиноземистой керамики с использованием в качестве исходного материала высококачественного порошка плавного корунда, а также легирующих добавок, активирующих процесс спекания. По результатам установленных зависимостей эксплуатационных свойств получаемого материала от характеристик исходных компонентов, режимов их подготовки, последующего формования и спекания определены технологические режимы гранулирования исходных компонентов, последующего прессования и высокотемпературного спекания. Свойства полученного материала приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Свойства синтезированного радиопрозрачного материала на основе высокоглиноземистой керамики

Table 1. Properties of the synthesized radar-transparent material based on high-alumina ceramics

Измеряемая характеристика	Значение
Диапазон рабочих частот, ГГц	6,5–10,5
Диэлектрическая проницаемость при $f=7$ ГГц	6–8
Тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta \varepsilon$	$\leq 0,0007$
Отклонение ε в диапазоне воздействий, %	$\pm 2,8$
Поглощение ЭМИ, %	Не более 2,0
Кажущаяся плотность, г/см ³	Не более 2,7
Предел прочности на изгиб, МПа	Не менее 50
Водопоглощение, %	Не более 0,1
Модуль упругости на изгиб, ГПа	Не менее 30
Термостойкость, К	850

С учетом этого определены следующие направления исследований [5, 6]:

1) разработка составов и способов получения композиционного радиопоглощающего материала на основе ферритмагнетиков; материалов для использования в качестве высокотемпературной диэлектрической матрицы; композиционных материалов для выполнения функции поглотителя электромагнитных волн в заданном диапазоне частот и температур;

2) определение рационального соотношения диэлектрическая матрица/поглощающий наполнитель для достижения максимального эффекта поглощения ЭМИ; способов и технологических режимов изготовления изделий и нанесения покрытий из радиопоглощающих материалов и др.

Электрофизические характеристики полученного материала соответствуют требованиям по радиопрозрачности, определяемыми условиями эксплуатации изготовленных из него изделий.

Современные керамические радиопоглощающие материалы представляют собой композиционную керамику, которая обеспечивает поглощение электромагнитного излучения за счет диэлектрических и магнитных потерь [4]. Эти материалы создаются на основе: ферритмагнитных композиций, сохраняющих свои функциональные свойства при температуре до 600 °С, что связано с нарушением их магнитных характеристик при температуре, превышающей точку Кюри; композиционных материалов, состоящих из диэлектрической матрицы, легированной высокотемпературными проводниками-поглотителями, синтезируемыми различными способами.

В качестве композиционного радиопоглощающего материала исследовались наноструктурированные порошки магнитомягкого никель-цинкового феррита ($\text{Ni}_{0,58}\text{Zn}_{0,36}\text{Mn}_{0,06}\text{Co}_{0,028}\text{Fe}_2\text{O}_4$) и магнитотвердого гексагонального феррита бария с W-фазой ($\text{BaCo}_2\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$). Для их получения отработаны технологические режимы механоактивированного синтеза (МАС) и механоактивированного самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (МАСВС).

Отработанные режимы подтверждены в ходе изготовления экспериментальных образцов композиционного материала. Так, для порошка никель-цинкового феррита после 6 ч механоактивации максимальный размер частиц не превышал 700 нм, а минимальный – составил ~ 25–30 нм. Такие размеры частиц наиболее целесообразны для формирования требуемых свойств синтезируемого материала. Съемка морфологии поверхности полученных частиц проводилась на аттестованном сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения Miра (производство Tescan, Чехия). Результаты морфологического анализа частиц никель-цинкового феррита представлены на рис. 1.

В ходе отработки технологических режимов синтеза гексагонального феррита бария методом МАС установлено, что минимальная продолжительность ферритизации с температурой 1250–1300 °С, при которой образуется 70–80 % W-фазы, составляет 2 ч. Как правило, 100%-ное превращение наблюдается после 4–6-часовой обработки и зависит от объемной загрузки печи. При МАСВС до 40 % W-фазы можно получить уже в процессе СВС. При этом изменение давления кислорода в реакторе с 0,5 по 2,0 МПа не оказывает существенного влияния на фазовый состав продуктов СВС. Максимальное содержание W-фазы (до 80 %) образуется при соотношении $\text{Fe}:\text{Fe}_2\text{O}_3$, равном 6:4. Фазовый состав порошков, полученных по схеме МАСВС с последующей ферритизацией, практически не отличается от МАС-порошков. Соответственно, как менее трудоемкий механоактивированный синтез выбран в качестве базового метода получения гексагонального феррита бария.

Разработанные ферритмагнитные композиционные материалы проверялись на функциональность посредством исследования коэффициентов ослабления и отражения электромагнитного излучения (ЭМИ). Все синтезированные материалы показали удовлетворительные результаты по отражению ЭМИ. Так, коэффициент отражения для всех рассматриваемых материалов составил меньше –5 дБ во всей полосе измеряемых частот. При этом лучший результат (до –12 дБ в полосе частот от 8 до 9,5 ГГц) был у магнитомягкого никель-цинкового феррита, полученного методом МАСВС.

Таким образом, для узлов авиационной и космической техники, эксплуатируемых при температурах ниже точки Кюри, отработаны составы и технологические режимы синтеза ферритмагнитных порошков, которые используются в качестве наполнителей в различные диэлектрические матрицы, в том числе покрасочный материал на корпусные изделия, а также в виде пластин спеченного материала и газотермических покрытий на подложки из алюминиевых сплавов. Для узлов и агрегатов, эксплуатируемых при более высоких температурах, разработаны соответствующие составы композиционного материала и определены необходимые технологические режимы его получения.

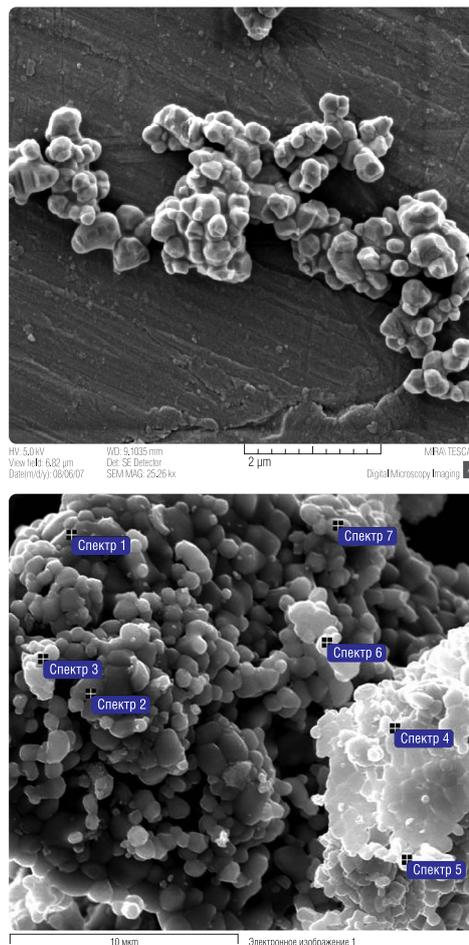


Рис. 1. Морфология поверхности частиц никель-цинкового феррита после механоактивации

Fig. 1. Surface morphology of nickel-zinc ferrite particles after mechanical activation

В процессе создания высокотемпературных радиопоглощающих материалов решались задачи по изготовлению диэлектрической матрицы и поглотителя электромагнитного импульса. Для изготовления высокотемпературной диэлектрической матрицы изучали оксид алюминия, нитрид алюминия или их композицию. По результатам исследования в качестве базового матричного материала выбран порошок оксида алюминия. Выбор обоснован тем, что диэлектрический материал на основе оксида алюминия наиболее подходит для решаемых задач по диэлектрической проницаемости ($\epsilon = 9,5\text{--}9,7$), имеет высокую рабочую температуру (до $1400\text{ }^\circ\text{C}$) и, что является решающим фактором, на его основе можно получать наиболее качественные толсто-пленочные покрытия методом газотермического напыления.

В качестве высокотемпературного поглотителя ЭМИ исследованы три группы проводниковых материалов: резистивные материалы, содержащие МАХ-фазы, жаростойкие сплавы и интерметаллиды. Все эти материалы также характеризуются высокой рабочей температурой свыше $1200\text{ }^\circ\text{C}$, обладают свойствами электропроводности, что обеспечивает высокие потери на проводимость в составе радиопоглощающего материала. МАХ-фазы и интерметаллиды получали путем МАСВС, а жаропрочные сплавы создавали методом диспергирования расплава из лигатуры с применением метода МАС из шихты соответствующего состава.

По результатам проведенного исследования предложены композиционные радиопоглощающие материалы, содержащие от 41,0 до 53,0 % диэлектрика в виде $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ и от 39 до 56 % проводникового поглотителя, что в итоге позволяет обеспечивать диэлектрические потери, потери на проводимость, а у жаростойких сплавов и магнитные потери в диапазоне частот 8–12 ГГц. Полученные результаты свидетельствуют о применимости методов порошковой металлургии для создания или разработки материалов с широким спектром свойств и изделий из них.

Дальнейшее развитие этих методов заключается в переходе от формирования фазового состава материала за счет включения в перемешиваемую шихту порошковых компонентов, состав и кристаллическое строение которых остаются неизменными на всех этапах его получения, к синтезу требуемого фазового состава за счет взаимодействия порошковых компонентов на одной из стадий технологического передела (например, прессования или спекания). Для этого на одном из этапов передела предусмотрены соответствующие технологические процессы. К таким процессам можно отнести инфильтрацию, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, реакционное спекание и др. Характерным примером такого развития является технология реакционного спекания, применяемая в процессе синтеза карбидокремниевой керамики.

Получение карбидокремниевой керамики. Карбидокремниевая керамика может использоваться для получения таких изделий конструкционного и триботехнического назначения, как конструкционные изделия авиационной и космической техники (например, подложки оптических зеркал), торцевые уплотнения, радиальные подшипники скольжения, работающие в жестких условиях абразивных и химически активных сред, при высоких температурах, в открытом космосе, а также как конструкционный материал для изготовления различных элементов благодаря следующим уникальным свойствам [1, с. 193–200]:

твердость, уступающая только твердости алмаза и карбида бора;

теплопроводность, на два порядка превышающая теплопроводность используемых в настоящее время материалов;

модуль Юнга и удельная жесткость, в 3–5 раз превышающие модуль Юнга и удельную жесткость используемых в настоящее время материалов;

наиболее высокая коррозионная стойкость по сравнению с другими керамическими материалами;

возможность пайки отдельных элементов из карбидокремниевой керамики;

возможность пайки со стеклом для придания необходимых оптических свойств.

В Институте порошковой металлургии имени академика О.В. Романа проведены исследования процессов получения изделий из карбидокремниевой керамики методом реакционного спекания, изучены закономерности воздействия химического и фазового состава используемых ингредиентов и функциональных добавок на формирование их структуры и физико-механические свойства, показано, что уровень свойств реакционноспеченной карбидокремниевой керамики определяется дисперсностью, составом ингредиентов и температурно-временными параметрами реакционного

спекания. Для повышения скорости процессов массопереноса кремния, наиболее полного его химического взаимодействия с углеродом и повышения свойств предложено использовать углеродсодержащие добавки с различной кристаллической структурой, в частности в виде углеродных волокон.

Применение порошков карбида кремния различных фракций в определенной пропорции и активации процесса образования вторичного карбида кремния при реакционном спекании обеспечивает формирование в процессе реакционного спекания плотной однородной мелкозернистой структуры (рис. 2, *a*) со стабильным уровнем свойств: плотность 2,9–3,1 г/см³; твердость до 86–92 HRA; микротвердость карбидной фазы 20–25 ГПа; предел прочности при изгибе 230–300 МПа; модуль Юнга 350–385 ГПа; коэффициент термического расширения $4,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Металлографический анализ образцов SiC-керамики, полученной из шихт составов «порошки SiC + углеродное волокно (УВ)», показал, что при содержании в шихте УВ до 20 мас.% (рис. 2, *b*) структура керамики практически не отличается от керамики базового состава из шихты SiC + 15 % сажи (рис. 2, *a*). Однако при содержании УВ более 20 мас.% структура композита носит двухфазный характер (рис. 2, *d*), когда одна фаза композита характеризуется структурой керамики с содержанием волокна в пределах 10–20 мас.%, другая – обособленными зонами, образованными в местах скопления гранул углеродных волокон. Это наиболее существенное отличие керамики из шихт составов SiC + УВ и керамики SiC + сажа.

Керамика состава SiC + 10 % УВ характеризуется достаточно мелкозернистым строением со средним размером зерна 35–45 мкм. Карбидные зерна практически не образуют сростков и их расположение в кремниевой матрице носит обособленный характер. Можно сказать, что эта структура построена на кремниевом каркасе. Зоны и прослойки свободного кремния имеют размеры в пределах 10–50 мкм и твердость в среднем 10 ГПа при твердости карбидного зерна 23–27 ГПа. Следует отметить, что твердость карбидных зерен достаточно высокая и превосходит таковые в керамике из шихты SiC + 15 % сажи. Можно предположить, что часть карбидных зерен является продуктом синтеза углеродного волокна и расплава кремния. Это относится к карбидным зернам твердостью 26–27 ГПа, принимая во внимание, что твердость таковых в керамике из шихты SiC + 15 % сажи в большинстве случаев составляет 20–23 ГПа.

Микроструктура керамики из шихты состава 100 % SiC + 20 % УВ более плотная, имеются сростки карбидных зерен, в структуре присутствует большое количество мелких (2–5 мкм) включений темного цвета. Возможно, что это мелкие карбиды кремния, синтезированные с участием фрагментов углеродных волокон, растворившихся в расплаве кремния. Размеры карбидных зерен находятся в пределах 10–100 мкм. Следов углеродных волокон не обнаружено. Твердость карбидных зерен и зон свободного кремния составляет 18–25 ГПа и 6,9–7,0 ГПа соответственно.

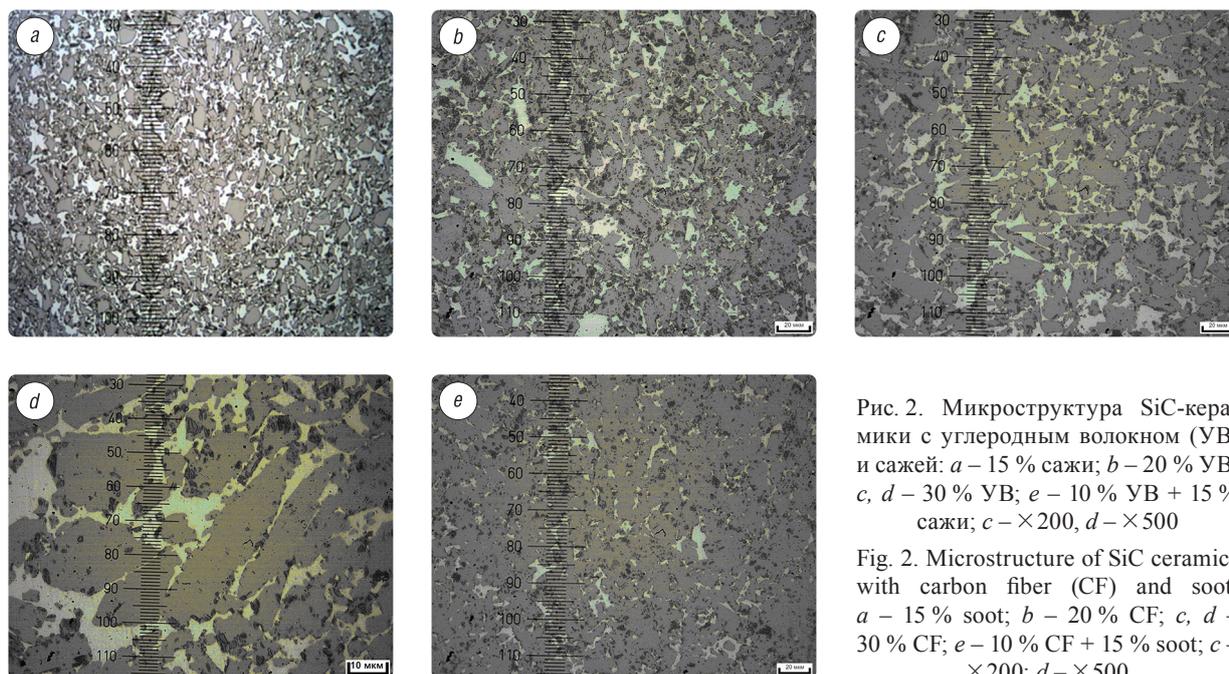


Рис. 2. Микроструктура SiC-керамики с углеродным волокном (УВ) и сажей: *a* – 15 % сажи; *b* – 20 % УВ; *c*, *d* – 30 % УВ; *e* – 10 % УВ + 15 % сажи; *c* – $\times 200$, *d* – $\times 500$

Fig. 2. Microstructure of SiC ceramics with carbon fiber (CF) and soot: *a* – 15 % soot; *b* – 20 % CF; *c*, *d* – 30 % CF; *e* – 10 % CF + 15 % soot; *c* – $\times 200$; *d* – $\times 500$

Особенностью микроструктуры SiC-керамики, полученной из шихты состава SiC + 30 % УВ при температуре силицирования 1500 °С (рис. 2, *c, d*), является наличие в ней плотных крупных (до 1000 мкм) включений карбида кремния, имеющих четкие границы раздела между основным полем композита и этими обособленными участками. Форма таких включений преимущественно овальная и свидетельствует о том, что они сформированы на месте сферических гранул, которые в свою очередь образовались в процессе смешивания порошков карбида кремния и углеродных волокон. Микротвердость таких зон составляет 25–28 ГПа, что выше твердости основного поля керамики. При более детальном рассмотрении структуры этих включений можно видеть, что это тоже SiC-керамика, только на основе сросшихся между собой крупных зерен размером до 20 мкм с очень небольшим содержанием свободного кремния.

Установлено, что в силу неоднородного распределения углеродного волокна в объеме шихты, а также образования в шихте крупных скоплений углеродных волокон отдельные зоны прессовки оказываются обедненными углеродом, а полученная SiC-керамика имеет неоднородность по химическому составу. Для устранения возможного дефицита углерода в шихту состава SiC + УВ дополнительно вводили 10 мас.% сажи. Это позволило обеспечить более равномерное распределение углерода в объеме прессовки. Структура такой керамики характеризуется плотным строением, в котором карбидные зерна контактируют между собой через тонкие (2–5 мкм) прослойки свободного кремния (рис. 2, *e*). При этом содержание карбида кремния составляет 83 %, свободного кремния – 17 %. Отличительной особенностью микроструктуры такого композита является сросшенность карбидных зерен прослойками свободного кремния. Кроме того, сросшиеся зерна карбида кремния имеют сильно развитую поверхность контакта между собой и свободным кремнием.

Проведенные исследования прочности реакционноспеченной SiC-керамики показали, что введение в состав шихты взамен технического углерода дисперсных углеродных волокон диаметром 6–8 мкм и длиной 100–250 мкм в количестве 10–20 % оказывает положительное влияние. Так, при введении в шихту на основе порошков карбида кремния 20 % углеродных волокон предел прочности при изгибе составил 292 МПа, что значительно превышает прочность SiC-керамики, полученной из шихты, содержащей такое же количество углерода в виде сажи. Это свидетельствует о высокой химической активности углеродных волокон при взаимодействии их с расплавом кремния. Данное обстоятельство очень важно при получении SiC-керамики методом реакционного спекания, при котором фазовый состав и, как следствие, механические

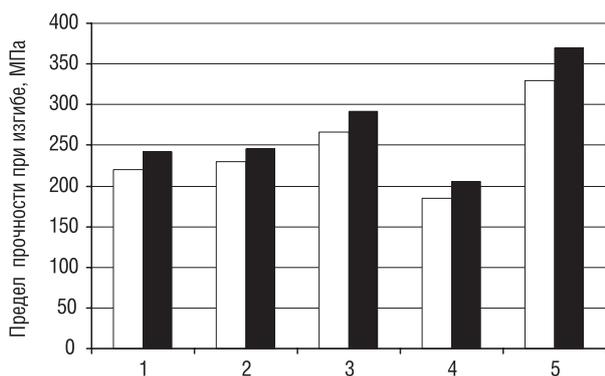


Рис. 3. Влияние содержания углеводородного волокна (УВ) или сажи в шихте и температуры силицирования на прочность SiC-керамики: □ – температура силицирования 1500 °С; ■ – температура силицирования 1650 °С; 1 – без добавок; 2 – 10 % УВ; 3 – 20 % УВ; 4 – 30 % УВ; 5 – 10 % УВ + 15 % сажи

Fig. 3. Effect of carbon fiber (CF) or soot content in the charge mixture and siliconizing temperature on the strength of SiC-ceramics: □ – siliconizing temperature 1500 °C; ■ – siliconizing temperature 1650 °C; 1 – no additives; 2 – 10 % CF; 3 – 20 % CF; 4 – 30 % CF; 5 – 10 % CF + 15 % soot

свойства керамики формируются в основном за счет полноты протекания химического взаимодействия твердых компонентов шихты с расплавом кремния.

Важную роль при этом оказывает и температурный фактор, который обуславливает фазовое превращение гексагонального (политип 6H) карбида кремния в кубическую модификацию (политип 3C). Использование различных температурных режимов силицирования показало, что для достижения наибольших механических свойств требуется температура 1650 °С, при которой прочность на 10–12 % выше, чем при температуре 1500 °С (рис. 3). Максимальное значение предела прочности при изгибе реакционноспеченной SiC-керамики, полученной из шихты, содержащей 10 % УВ + 15 % сажи, при температуре силицирования 1650 °С составило 370 МПа.

Формирующаяся при силицировании структура определяет износостойкость исследуемого материала (рис. 4). При введении 10 % УВ

износ материала несколько возрастает из-за увеличения количества мягкой углеродной фазы. Повышение содержания карбидной фазы за счет образования вторичного карбида на поверхности УВ при более высокой температуре силицирования и большем времени выдержки, а также за счет введения большего количества сажи приводит к повышению износостойкости материала. Минимальный износ наблюдается при введении 20 % УВ и силицировании при 1650 °С в течение 2 ч.

Результаты исследований по получению композиционных реакционноспеченных материалов на основе карбида кремния были использованы авторами при разработке режимов получения крупногабаритных составных подложек зеркал аэрокосмического назначения, изделий антифрикционного и специального назначения

Таким образом, современная порошковая металлургия является универсальным методом получения композиционных материалов для авиационной и космической отраслей не только за счет подбора компонентов и технологических режимов их подготовки, смешивания и компактирования, но и синтеза новых веществ на всех этапах его передела. Перечисленные технологические режимы в последующем определяют эксплуатационные свойства композиционного материала. Накопленные знания подготовки и компактирования порошков в настоящее время активно внедряются и в другие производственные процессы, в которых методы порошковой металлургии ранее не применялись. Прежде всего это получение энергонасыщенных гетерогенных композиционных материалов, имеющих в своем составе порошковые компоненты.

Получение энергонасыщенного гетерогенного композиционного материала. Под энергонасыщенным гетерогенным композиционным материалом (ЭГКМ) понимается твердофазный многокомпонентный структурно неоднородный материал, который является источником концентрированной энергии, выделяющейся в режиме управляемого горения и необходимой для совершения работы технической системой, в чей состав этот материал входит. Современные ЭГКМ используются в качестве топлива для ускорителей космических ракет, твердотопливных ракетных двигателей или твердотопливных газогенераторов [7].

Основными компонентами ЭГКМ являются окислитель, горючее и различные технологические и эксплуатационные добавки. Компоненты выбираются с учетом требуемых свойств изготавливаемого ЭГКМ, для достижения которых рассчитывают целесообразную стехиометрию химических веществ. Методология расчета компонентов ЭГКМ основана на достижении оптимального кислородного баланса, который должен быть получен при эксплуатации данных материалов [8]. Типовой состав ЭГКМ, разработанный в Государственном научно-производственном объединении порошковой металлургии, приведен в [9]. Основная часть компонентов (около 80–90 мас.%) представлена твердой фазой, которая в процессе перемешивания в жидкофазном полимерном связующем равномерно распределяется в объеме материала, образуя плотную укладку частиц.

От равномерности распределения компонентов зависит стабильность энергетических характеристик и физико-механические свойства изделия, изготовленного из ЭГКМ, а показатель плотности укладки частиц характеризует удельное значение импульса тяги на единицу объема материала. Для достижения требуемых плотности укладки частиц и равномерности распределения компонентов в материале используют методы порошковой металлургии, которые применяются на этапах подготовки порошковых компонентов и их смешивания.

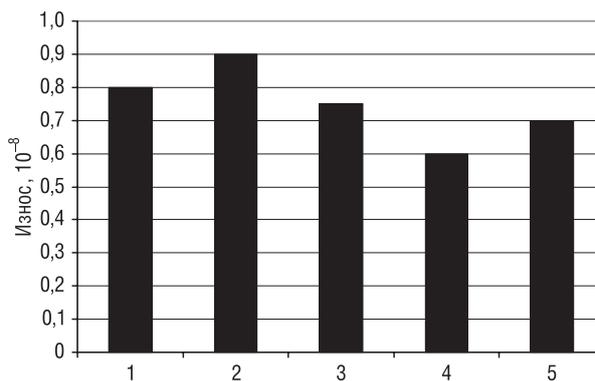


Рис. 4. Влияние содержания углеводородного волокна (УВ) и режимов силицирования на износостойкость SiC-керамики: 1 – без УВ, силицирование при 1500 °С, 1 ч; 2 – 10 % УВ, силицирование при 1500 °С, 1 ч; 3 – 10 % УВ, силицирование при 1650 °С, 2 ч; 4 – 20 % УВ, силицирование при 1650 °С, 2 ч; 5 – 10 % УВ + 15 % сажи, силицирование при 1650 °С, 2 ч

Fig. 4. Effect of carbon fiber (CF) content and siliconizing modes on the wear resistance of SiC-ceramics: 1 – without CF, siliconizing at 1500 °C, 1 h; 2 – 10 % CF, siliconizing at 1500 °C, 1 h; 3 – 10 % CF, siliconizing at 1650 °C, 2 h; 4 – 20 % CF, siliconizing at 1650 °C, 2 h; 5 – 10 % CF + 15 % soot, siliconizing at 1650 °C, 2 h

Твердофазные компоненты ЭГКМ представляют собой полидисперсные порошки, размер частиц которых находится в интервале от 20–30 нм до 300–400 мкм. Основная часть порошковых компонентов – это аммониевая соль хлорной кислоты (до 70–85 мас.%), ее частицы имеют размер от 20–30 мкм до 300–400 мкм. Второй по количеству порошковый компонент – энергетическая добавка, в качестве которой могут выступать металлы, имеющие высокую теплоту сгорания, их сплавы, циклические нитрамыны и др. [10]. Размеры частиц энергетической добавки, как правило, соизмеримы с размерами частиц аммониевой соли хлорной кислоты (за исключением наноразмерных энергетических добавок типа Alex [11]). Частицы остальных компонентов, которые вводятся в ЭГКМ в количестве от 0,5 до 1 мас.%, имеют размер от 20–30 нм до 20–30 мкм.

Известно, что частицы одного размера образуют укладку с максимальной плотностью до 0,74 (или $\pi/3\sqrt{2}$) [12]. С учетом установленного количества жидкой фазы (до 15 мас.%) в ходе смешивания требуется достичь относительной плотности укладки частиц твердой фазы не менее 0,85, что обуславливает необходимость подбора не менее трех фракций порошковых компонентов. Предполагается, что в процессе перемешивания твердофазных компонентов в полимерном связующем частицы с меньшим размером займут пустоты между частицами более крупной фракции без нарушения образующейся гексагональной плотной укладки.

С целью определения целесообразного фракционного состава и доли каждой из фракций, установления зависимостей между размерами фракций была построена геометрическая модель элементарной частицы. Для построения геометрической модели принято, что элементарная ячейка типового состава ЭГКМ состоит из 13 частиц крупной фракции порошковых компонентов. При этом в центре рассматриваемой ячейки находится частица энергетической добавки с примыкающими к ней частицами аммониевой соли хлорной кислоты. Образовавшиеся пустоты заполняются более мелкими частицами аммониевой соли хлорной кислоты. В свою очередь пустоты между ними должны заполняться частицами катализаторов и антиоксиданта, в качестве которого применяли ультрадисперсные алмазы (УДА).

Порядок построения геометрической модели, выбор и обоснование представительного элемента описаны в [13]. Вид геометрической модели элементарной ячейки с взаимным расположением частиц энергетической добавки и крупной фракции аммониевой соли хлорной кислоты, а также ее представительного элемента с взаимным расположением частиц энергетической добавки, крупной и мелкой фракций аммониевой соли хлорной кислоты, катализаторов и антиоксиданта показаны на рис. 5.

По результатам моделирования были уточнены характеристики порошковых компонентов, формирующих элементарную ячейку, значения которых приведены в табл. 2.

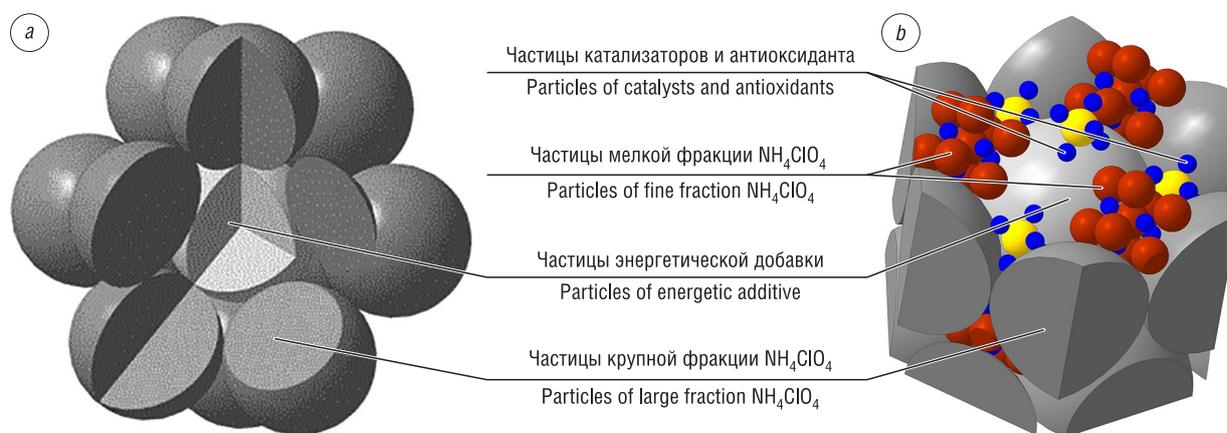


Рис. 5. Модель элементарной ячейки при гексагональной плотной укладке частиц с координационным числом 12 (a) и ее представительный элемент (b)

Fig. 5. Model of a unit cell in a hexagonal dense packing of particles with a coordination number of 12 (a) and its representative element (b)

Т а б л и ц а 2. Характеристики компонентов твердой фазы энергонасыщенного гетерогенного композиционного материала, формирующих элементарную ячейку

Table 2. Characteristics of the solid phase components of energy-saturated heterogeneous composite materials that form the unit cell

Наименование компонента	Радиус частиц, м	Количество компонента в составе ЭГКМ		Объем одной частицы вещества, м ³	Масса одной частицы, кг	Количество частиц в элементарной ячейке, ед.	Масса частиц в элементарной ячейке, кг	Площадь поверхности частиц, м ²
		мас.%	кг					
NH ₄ ClO ₄	1,2 · 10 ⁻⁴	70,0	2,320	7,23 · 10 ⁻¹²	1,41 · 10 ⁻⁸	12	1,69 · 10 ⁻⁷	2,17 · 10 ⁻⁶
	2,5 · 10 ⁻⁵	7,5	0,250	6,54 · 10 ⁻¹⁴	1,27 · 10 ⁻¹⁰	143	1,82 · 10 ⁻⁸	1,12 · 10 ⁻⁶
Энергетическая добавка	1,2 · 10 ⁻⁴	5,5	0,180	7,23 · 10 ⁻¹²	1,31 · 10 ⁻⁸	1	1,31 · 10 ⁻⁸	1,8 · 10 ⁻⁷
Катализатор I	7,7 · 10 ⁻⁶	1,0	0,033	1,91 · 10 ⁻¹⁵	1,21 · 10 ⁻¹¹	193	2,33 · 10 ⁻⁹	1,4 · 10 ⁻⁷
Катализатор II	8 · 10 ⁻⁸	0,5	0,016	2,14 · 10 ⁻²¹	9,08 · 10 ⁻¹⁸	128 · 10 ⁶	1,16 · 10 ⁻⁹	1,03 · 10 ⁻⁵
Антиоксидант	2 · 10 ⁻⁸	0,5	0,016	3,35 · 10 ⁻²³	1,29 · 10 ⁻¹⁹	9,026 · 10 ⁹	1,16 · 10 ⁻⁹	4,5 · 10 ⁻⁵

В ходе моделирования установлено, что порошковые компоненты, вводимые в ЭГКМ и имеющие размер наноуровня, ввиду незначительного их количества могут не учитываться при расчетах степени заполняемости пустот. Были определены требуемые соотношения в размерах фракций порошков, которые можно выразить через следующую зависимость:

$$D_l \approx (0,2 \div 0,225) \cdot D_b, \quad (1)$$

где D_l – диаметр частиц базовой фракции, D_b – диаметр частиц более крупной фракции.

По результатам моделирования было уточнено стехиометрическое соотношение компонентов (увеличена доля аммониевой соли хлорной кислоты на 1 мас.% за счет уменьшения количества полимерного связующего), что позволило улучшить кислородный баланс и увеличить суммарный импульс тяги ЭГКМ на 1,76 %.

Для определения продолжительности смешивания компонентов ЭГКМ изучалась степень равномерности распределения компонентов с учетом обязательности смачивания поверхности твердофазных компонентов полимерным связующим и заполнения им всех пустот. С использованием полученных данных проводилось моделирование смешивания компонентов ЭГКМ, результаты которого описаны в [14].

По итогам моделирования установлено оптимальное время перемешивания (≈ 22 мин) для выбранного технологического оборудования, а также другие режимы работы оборудования.

Заключение. Технология порошковой металлургии способствует получению композиционных материалов с уникальным комплексом свойств, что обеспечивает возможность применения их для изделий авиационной и космической техники. Так, композиционные порошковые материалы на основе магнитомягкого никель-цинкового феррита (NiO_{0,58}ZnO_{0,36}Mn_{0,06}Co_{0,028}Fe₂O₄) и магнитотвердого гексагонального феррита бария с W-фазой (BaCo₂Fe₁₆O₂₇) применяются как радиопоглощающие, на основе карбидокремниевой керамики – для крупногабаритных составных подложек зеркал аэрокосмического назначения, изделий антифрикционного и специального назначения, материалы на основе аммониевой соли хлорной кислоты – для получения ЭГКМ.

При исследовании процессов получения радиопрозрачных и радиопоглощающих материалов отработаны составы и технологические режимы синтеза ферритмагнитных порошков (никель-цинкового феррита и магнитотвердого гексагонального феррита бария с W-фазой), используемых в качестве наполнителей в различные диэлектрические матрицы. Для узлов и агрегатов, эксплуатируемых при более высоких температурах, разработаны составы на основе резистивных материалов, содержащих МАХ-фазы, жаростойких сплавов и интерметаллидов, для которых определены необходимые технологические режимы получения радиопоглощающего материала. По результатам исследования разработаны композиционные радиопоглощающие материалы, содержащие от 41,0 до 53,0 % диэлектрика в виде α -Al₂O₃ и от 39 до 56 % проводникового поглотителя. Применение полученных материалов позволяет обеспечивать диэлектрические потери и потери на проводимость, а у жаростойких сплавов – и магнитные потери в диапазоне частот 8–12 ГГц.

При исследовании процессов получения карбидокремниевой керамики установлено, что введение дискретных УВ приводит к увеличению пористости карбидокремниевых материалов на 3–5 %, в то же время в процессе спекания объемных изменений не происходит. Введение УВ в объеме 10–20 % способствует повышению прочности SiC-керамики на 5–20 %, в количестве 30 % – к снижению прочности на 40 МПа вследствие неравномерности структуры, а также повышенному содержанию свободного кремния из-за большой пористости спеченного карбидного каркаса по причине произвольного расположения волокон. Повышение температуры силицирования и введение дополнительного количества сажи обеспечивает более высокую прочность SiC-керамики. Увеличение времени выдержки при силицировании способствует формированию в поверхностном слое УВ вторичного карбида кремния нестехиометрического состава с микротвердостью 15–17 ГПа. Формирующаяся при силицировании структура определяет износостойкость исследуемого материала, в свою очередь повышение содержания карбидной фазы за счет образования вторичного карбида на поверхности УВ при более высокой температуре силицирования и большем времени выдержки, а также за счет введения большего количества сажи приводит к повышению износостойкости материала в 1,3 раза.

При исследовании процессов получения ЭГКМ определена зависимость эксплуатационных характеристик материала от фракционного состава его порошковых компонентов. Установлена возможность корректировки стехиометрического состава ЭГКМ и, соответственно, повышения его энергетических характеристик за счет оптимизации укладки частиц твердофазных компонентов. Установлены зависимости в линейных размерах частиц для каждой из фракций порошков.

Полученные при изготовлении ЭГКМ положительные результаты свидетельствуют, что методы и способы в порошковой металлургии могут быть успешно применены для подбора порошковых компонентов и получения композиционных материалов, из которых изготавливаются источники энергии для ракетных двигателей и твердотопливных генераторов.

Список использованных источников

1. Порошковая металлургия в Беларуси: вызовы времени: сб. науч. ст. / НАН Беларуси, ГНПО порошковой металлургии; редкол.: А. Ф. Ильющенко (гл. ред.) [и др.]. – Минск: Беларус. навука, 2017. – 532 с.
2. Кипарисов, С. С. Порошковая металлургия / С. С. Кипарисов, Г. А. Либенсон. – М.: Наука, 1980. – 496 с.
3. Суздальцев, Е. И. Керамические радиопрозрачные материалы: вчера, сегодня и завтра / Е. И. Суздальцев // Новые огнеупоры. – 2014. – № 10. – С. 5–15.
4. Ковнеристый, Ю. К. Материалы, поглощающие СВЧ-излучения / Ю. К. Ковнеристый, И. Ю. Лазарева, А. А. Раваев. – М.: Наука, 1982. – 165 с.
5. Синтез и исследование радиопоглощающих материалов на основе ферромагнетиков / А. Ф. Ильющенко [и др.]. // Порошковая металлургия в Беларуси: вызовы времени: сб. науч. ст. / НАН Беларуси, ГНПО порошковой металлургии; редкол.: А. Ф. Ильющенко (гл. ред.) [и др.]. – Минск: Беларус. навука, 2017. – С. 174–186.
6. Ильющенко, А. Ф. Научные подходы к созданию радиопоглощающих материалов СВЧ-диапазона для работы при повышенных температурах / А. Ф. Ильющенко, С. Г. Барай, Н. В. Насонова // Порошковая металлургия: респ. сб. науч. тр. – Минск: Беларус. навука, 2014. – Вып. 37. – С. 6–13.
7. Энергонасыщенные гетерогенные композиционные материалы на полимерной основе. Некоторые проблемы разработки и пути их решения / А. Ф. Ильющенко [и др.] // Порошковая металлургия: респ. межведомств. сб. науч. тр. / редкол.: А. Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск: Нац. акад. наук Беларуси, 2016. – Вып. 39. – С. 12–16.
8. Способы повышения эксплуатационных свойств энергонасыщенного гетерогенного композиционного материала / О. К. Кривонос [и др.] // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы, сварка: сб. докл. 11-го междунар. симп.: в 2 ч. / Нац. акад. наук Беларуси [и др.]; редкол.: А. Ф. Ильющенко (гл. ред.) [и др.]. – Минск: Беларус. навука, 2019. – Ч. 1. – С. 517–526.
9. Выбор критериев оценки качества смешивания компонентов энергонасыщенного гетерогенного композиционного материала / О. К. Кривонос [и др.] // Порошковая металлургия: респ. межведомств. сб. науч. трудов / редкол.: А. Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск: Нац. акад. наук Беларуси, 2019. – Вып. 42. – С. 146–153.
10. Энергетические добавки в составе смесевых энергонасыщенных композиционных гетерогенных материалов / А. Ф. Ильющенко [и др.] // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы, сварка: сб. докл. 10-го Междунар. симп.: в 2 ч. / Нац. акад. наук Беларуси [и др.]; редкол.: А. Ф. Ильющенко (гл. ред.) [и др.]. – Минск: Беларус. навука, 2017. – Ч. 1. – С. 429–440.
11. Ильющенко, А. Ф. Введение наноразмерных добавок при модифицировании энергонасыщенного гетерогенного композиционного материала / А. Ф. Ильющенко, Е. Е. Петюшик, О. К. Кривонос // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2019. – Т. 64, № 2. – С. 135–142. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-2-135-142>

12. A formal proof of the Kepler conjecture [Electronic resource] / T. Hales [et al.]. – Mode of access: https://www.cambridge.org/core/journals/forum-of-mathematics-pi/article/formal-proof-of-the-kepler-conjecture/78FBD5E1A3D1BCCB8E0D5B0C463C9FBC?utm_source=Eureks&utm_medium=PR&utm_campaign=FMP_HAlesKepler_jun17– Date of access: 30.07.2020.<https://doi.org/10.1017/fmp.2017.1>

13. Kryvanos, A. K. Modeling of structure formation of energy-saturated heterogeneous composite material / A. K. Kryvanos, A. Ph. Ilyushchanka, V. M. Buloychik // J. Phys.: Conf. Ser. – 2020. – Vol. 1507 – P. 082037. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1507/8/082037>

14. Формалізацыя працэса і разробка алгарытма твёрдафазнага смешвання кампанентаў гетэрагенна-го кампазіцыйнага матэрыяла / А. Ф. Ільющэнка [і др.] // Весті Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, №3. – С. 263–270. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-3-263-270>

References

1. Ilyushchanka A. Ph. [et al.], eds. *Powder Metallurgy in Belarus: Challenges of the Time: Collection of Scientific Papers*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2017. 532 p. (in Russian).

2. Kiparisov S. S., Libenson G. A. *Powder Metallurgy*. Moscow, Nauka Publ., 1980. 496 p. (in Russian).

3. Suzdal'tsev E. I. Ceramic radar-transparent materials: yesterday, today and tomorrow. *Novye ognepory = New Refractories*, 2014, no. 10, pp. 5–15.

4. Kovneristy Yu. K., Lazareva I. Yu., Ravaev A. A. *Materials Absorbing Microwave Radiation*. Moscow, Nauka Publ., 1982. 165 p. (in Russian).

5. Ilyushchanka A. Ph., Baray S. G., Talako T. L., Letsko A. I., Nasonova N. V. Synthesis and research of radar-absorbing materials based on ferrimagnets. *Poroshkovaya metallurgiya v Belarusi: vyzovy vremeni: sbornik nauchnykh statei* [Powder Metallurgy in Belarus: Challenges of the Time: Collection of Scientific Papers]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2017, pp. 174–186 (in Russian).

6. Ilyushchanka A. Ph., Baray S. G., Nasonova N. V. Scientific approaches to the production of microwave radar-absorbing materials for operation at elevated temperatures. *Poroshkovaya metallurgiya: respublikanskii sbornik nauchnykh trudov* [Powder Metallurgy: Republican Collection of Scientific Papers]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2014. Issue 37, pp. 6–13 (in Russian).

7. Ilyushchanka A. Ph., Kryvanos A. K., Piatsiushyk Ya. Ya., Smirnoy G. V. Energy-saturated heterogeneous composite materials based on polymer. Some development challenges and ways to solve them. *Poroshkovaya metallurgiya: respublikanskii mezhvedomstvennyi sbornik nauchnykh trudov* [Powder Metallurgy: Republican Interdepartmental Collection of Scientific Papers]. Minsk, National Academy of Sciences of Belarus, 2016. Issue. 39, pp. 12–16 (in Russian).

8. Kryvanos A. K., Ilyushchanka A. Ph., Piatsiushyk Ya. Ya., Smirnov G. V., Sudnik L. V., Mikulish D. A. Methods for increasing the operational properties of energy-saturated heterogeneous composite material. *Poroshkovaya metallurgiya: inzheneriya poverkhnosti, novye poroshkovye kompozitsionnye materialy, svarka: sbornik dokladov 11-go Mezhdunarodnogo simpoziuma. Chast' I* [Powder Metallurgy: Surface Engineering, New Powder Composite Materials. Welding: Collection of Papers of the 11th International Symposium. Part I]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2019, pp. 517–526 (in Russian).

9. Kryvanos A. K., Ilyushchanka A. Ph., Piatsiushyk Ya. Ya., Prokhorov M. U. The choice of criteria for assessing the quality of mixing the components of an energy-saturated heterogeneous composite material. *Poroshkovaya metallurgiya: respublikanskii mezhvedomstvennyi sbornik nauchnykh trudov* [Powder Metallurgy: Republican Interdepartmental Collection of Scientific Papers]. Minsk, National Academy of Sciences of Belarus, 2019. Issue 42, pp. 146–153 (in Russian).

10. Ilyushchanka A. Ph., Kryvanos A. K., Piatsiushyk Ya. Ya., Petrov I. V., Smirnov G. V., Sudnik L. V. Energetic additives in the composition of mixed energy-saturated composite heterogeneous materials. *Poroshkovaya metallurgiya: inzheneriya poverkhnosti, novye poroshkovye kompozitsionnye materialy, svarka: sbornik dokladov 10-go Mezhdunarodnogo simpoziuma. Chast' I* [Powder Metallurgy: Surface Engineering, New Powder Composite Materials. Welding: Collection of Papers of the 10th International Symposium. Part I]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2017, pp. 429–440 (in Russian).

11. Ilyushchanka A. Ph., Piatsiushyk Ya. Ya., Kryvanos A. K. Introduction of nanoscale additives in the process of modification of energy-saturated heterogeneous composite material. *Vesti Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2019, vol. 64, no. 2, pp. 135–142 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-2-135-142>

12. Hales H., Adams M., Bauer G., Dat Dang T. A formal proof of the Kepler conjecture. Available at: https://www.cambridge.org/core/journals/forum-of-mathematics-pi/article/formal-proof-of-the-kepler-conjecture/78FBD5E1A3D1BCB8E0D5B0C463C9FBC?utm_source=Eureks&utm_medium=PR&utm_campaign=FMP_HAlesKepler_jun17 (accessed 30 July 2020).

13. Kryvanos A. K., Ilyushchanka A. Ph., Buloychik V. M. Modeling of structure formation of energy-saturated heterogeneous composite material. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1507, p. 082037. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1507/8/082037>

14. Ilyushchanka A. Ph., Buloychik V. M., Kryvanos A. K., Piatsiushyk Ya. Ya. Formalization of the process and development of an algorithm for solid-phase mixing of components of a heterogeneous composite material. *Vesti Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 3, pp. 263–270 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-3-263-270>

Информация об авторах

Ильющенко Александр Федорович – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, генеральный директор Государственного научно-производственного объединения порошковой металлургии – директор Института порошковой металлургии имени академика О.В. Романа, Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: alexil@mail.belpak.by

Кривонос Олег Константинович – кандидат военных наук, доцент, заместитель генерального директора, Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: Krivonos_ok@tut.by

Петюшик Евгений Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора по научной работе, Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: pet65@bk.ru

Осипов Владимир Анатольевич – старший научный сотрудник, научно-исследовательская лаборатория «Сверхтвердые и износостойкие материалы», Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: foff2017@mail.ru

Барай Сергей Георгиевич – кандидат технических наук, заведующий лабораторией керамики, Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: baraysg@yahoo.com

Information about the authors

Aliaksandr Ph. Ilyushchanka – Correspondent Member of the National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Engineering), Professor, Director General of the State Research and Production Powder Metallurgy Association – Director of O. V. Roman Powder Metallurgy Institute, State Research and Production Powder Metallurgy Association (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alexil@mail.belpak.by

Aleh K. Kryvanos – Ph. D. (Military Science), Assoc. Prof., Deputy of Director General, State Research and Production Powder Metallurgy Association (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Krivonos_ok@tut.by

Yauheni Ya. Piatsiushyk – D. Sc. (Engineering), Professor, Deputy of Director General for Research Work, State Research and Production Powder Metallurgy Association (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pet65@bk.ru

Vladimir A. Osipov – Senior Researcher, Science Research Laboratory “Superhard and wear-resistant materials”, O. V. Roman Powder Metallurgy Institute (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: foff2017@mail.ru

Sergey G. Baray – Ph. D. (Engineering), Head of Ceramics Laboratory, O. V. Roman Powder Metallurgy Institute (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: baraysg@yahoo.com

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ

MATERIALS ENGINEERING, METALLURGY

УДК 537.533
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-285-291>

Поступила в редакцию 22.01.2020
Received 22.01.2020

Д. А. Антонович¹, В. А. Груздев¹, В. Г. Залесский², П. Н. Солдатенко¹

¹*Полоцкий государственный университет, Новополоцк, Республика Беларусь*

²*Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

**ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ
СОВМЕЩЕННЫХ ИОННО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ**

Аннотация. Одним из способов повышения эффективности реализации ионно-плазменных технологий воздействия на поверхности различных материалов является частичная или полная компенсация положительного заряда ионов в потоке или на обрабатываемой поверхности, для чего используются дополнительные эмитирующие системы, которые создают компенсирующие электронные потоки в разрядное пространство, ускоряющий промежуток или на обрабатываемую поверхность. Для реализации такого компенсирующего воздействия возможно применение плазменных источников заряженных частиц, способных при изменении полярности ускоряющего напряжения формировать пучки обоих знаков. Основная проблема при этом заключается в сложности достижения одновременно высокой эффективности эмиссии ионов и электронов, поскольку условия их эмиссии из плазмы существенно различаются. В данной статье предложена концепция и разработанная на ее основе конструкция макета мультиразрядного плазменного электронно-ионного источника для совместного или попеременного формирования электронных и ионных пучков. Показано, что в предложенной конструкции реализуется возможность повышения первеанса за счет компенсации объемного заряда частицами противоположного знака. Приведен ряд характеристик разработанного макета плазменного электронно-ионного источника (вольтамперные характеристики извлечения электронов и ионов) и показана его перспективность для дальнейшей разработки на его основе электронно-ионного источника для промышленного применения. Совмещенные или попеременные ионно-электронные пучки, формируемые в представленном источнике, могут быть использованы при реализации технологий нанесения тонкопленочных слоев металлов, полупроводников и диэлектриков для поддержания процессов ионизации и обеспечения устойчивого горения разряда, компенсации как объемного заряда в пучке, так и поверхностного на формируемой пленке.

Ключевые слова: плазменный источник заряженных частиц, электронно-ионное воздействие, электронные пучки, компенсированные ионные пучки

Для цитирования: Плазменный источник заряженных частиц для формирования совмещенных ионно-электронных пучков / Д. А. Антонович [и др.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, №3. – С. 285–291. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-285-291>

Dmitry A. Antonovich¹, Vladimir A. Gruzdev¹, Vitali G. Zalesski², Pavel N. Soldatenko¹

¹*Polotsk State University, Novopolotsk, Republic of Belarus*

²*Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

PLASMA SOURCE OF CHARGED PARTICLES FOR THE FORMATION OF COMBINED ION-ELECTRON BEAMS

Abstract. One of the ways to increase the efficiency of the implementation of ion-plasma technologies of exposure to the surfaces of various materials is partial or full compensation of the positive charge of ions in the stream or on the treated surface, for which additional emitting systems are used that create compensating electron flows in the discharge space, accelerating gap or on the processed surface. It was previously shown that for the implementation of such a compensating effect, it is possible to use plasma sources of charged particles, capable of forming beams of both signs when the polarity of the accelerating voltage is changed. The main problem in this case is the difficulty in achieving simultaneously high emission efficiency of ions and electrons, since the conditions for their emission from plasma are significantly different. This article proposes a concept and a design developed on its basis for a prototype of a multi-discharge plasma electron-ion source for the joint or alternating formation of electron and ion beams. It is shown that the proposed design realizes the possibility of

increasing the perveance by compensating for the space charge by particles of the opposite sign. A number of characteristics of the developed model of a plasma electron-ion source (current-voltage characteristics of the extraction of electrons and ions) are presented and its prospects for further development of an electron-ion source for industrial use on its basis are shown. Combined or alternating ion-electron beams formed in the presented source can be used to implement the technology of applying thin-film layers of metals, semiconductors, and dielectrics to maintain ionization processes and ensure stable discharge burning, compensation of both the space charge in the beam and the surface charge on the formed film.

Keywords: plasma source of charged particles, electron-ion influence, electron beams, compensated ion beams

For citation: Antonovich D. A., Gruzdev V. A., Zaleski V. G., Soldatenko P. N. Plasma source of charged particles for the formation of combined ion-electron beams. *Vestsi Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 3, pp. 285–291 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-285-291>

Введение. Одним из механизмов повышения эффективности ионно-плазменных технологий является частичная или полная компенсация положительного заряда ионов в потоке или на обрабатываемой поверхности [1]. Для компенсации, как правило, используются дополнительные эмитирующие системы, создающие компенсирующие электронные потоки в разрядное пространство, ускоряющий промежуток или на обрабатываемую поверхность. Наибольшее распространение в технологических магнетронных системах высокой мощности получили сильноточные твердотельные накаливаемые эмиттеры электронов, обеспечивающие устойчивое горение разряда или компенсацию объемного заряда в пучке [2]. В условиях интенсивных ионных потоков ресурс таких эмиттеров ограничен вследствие усиленной ионной бомбардировки, а сами накальные эмиттеры отличаются высоким энергопотреблением, инерционностью и низкой эффективностью [3]. Поэтому создание безнакальных компенсационных эмиттеров электронов остается актуальным.

Известно применение в качестве компенсирующих источников разрядных систем с полым катодом [1, 3]. Однако в данных системах следует учитывать взаимное влияние магнитных полей этих источников для обеспечения высокой эффективности технологического процесса, а также необходимо согласование систем электропитания и управления с параметрами ионного и электронного потоков, формируемых в независимых источниках.

В то же время низкоэнергетичные электронные пучки могут применяться самостоятельно или для ассистирующего термического воздействия на подложку для интенсификации плазмохимических процессов и повышения скорости диффузионных процессов при формировании покрытий. Поэтому для ряда технологий может представлять интерес воздействие не только частично или полностью компенсированными ионными пучками, но и попеременное (теплофизическое электронное и модифицирующее ионное) пучками заряженных частиц обоих знаков заряда.

Для реализации такого воздействия перспективным инструментом представляются плазменные источники заряженных частиц [3–6], не имеющие накаливаемых элементов. Несмотря на то что эмиттером заряженных частиц в таких системах является плазма и при изменении полярности ускоряющего напряжения можно формировать пучки обоих знаков, одновременно высокой эффективности эмиссии в таких системах достичь сложно, поскольку условия эмиссии ионов и электронов из плазмы существенно различаются.

Было показано [1, 2], что поскольку условия формирования, прежде всего по давлению, ионных пучков в известных системах магнетронного типа близки к условиям формирования электронных пучков в системах с плазменным эмиттером, то возможно создание комбинированных источников, обеспечивающих формирование как электронных, так и ионных пучков [7]. Авторами данной статьи предложена концепция и разработанная на ее основе конструкция единой мультиразрядной структуры, которая способна формировать совмещенные или попеременные ионно-электронные пучки, а также представлены некоторые экспериментальные параметры таких пучков.

Экспериментальный макет источника заряженных частиц. Разработанный макет электронно-ионного источника, эскиз электродной структуры которого представлен на рис. 1, представляет собой генератор эмитирующей плазмы, формируемой в объеме, который ограничен внутренними поверхностями катодов 2 и 4, анода 3 и эмиттерного электрода 5 (разрядная камера I). Электроды 6 и 7 создают промежуток ускорения электронов, где формируется поверхность плазмы, эмитирующая электроны. Электроды 8–12 образуют газоразрядную структуру, формирующую плазму, которая является источником распыляющих ионов. Данная структура состоит из двух соединенных последовательно (вдоль оси) газоразрядных ячеек «пеннинговского» типа (II и III) (Penning F. M.

Coating by cathode disintegration. US Patent 2,146,025 assignor to N.V. Philips', Gloeilampenfabrieken, Eindhoven, Netherlands; 1939). Элементы 9 и 11 являются анодами разрядных ячеек; элементы 8, 10 и 12 – катодами, которые одновременно используются в качестве полюсных наконечников постоянных магнитов, обеспечивающих осцилляцию электронов между катодами газоразрядной камеры II.

Одновременно с этим магнитное поле, формируемое катодами 8, 10 и 12, образует магнитную фокусирующую систему для ускоренного электронного пучка, который распространяется вдоль оси газоразрядной структуры II до выхода из источника ионно-электронного пучка в технологическую камеру. Между электродами 12 и 14 прикладывается напряжение, ускоряющее ионы до требуемой технологией энергии распыляющих ионов. В то же время в этом промежутке (между электродами 12 и 14) осуществляется торможение пучка электронов, ускоренных в промежутке между электродами 6 и 7. Эмитирующая ионы поверхность плазмы, формирующаяся между электродами 12 и 14, определяет траектории как ионов, так и электронов в пространстве дрейфа электронно-ионного пучка до распыляемой мишени, а значит, определяет распределение плотностей ионного и электронного тока по поверхности мишени.

На рис. 2 представлена схема подключения блоков питания к электродам макета. Независимые системы электропитания и ускорения для каждой разрядной камеры единой структуры позволяют

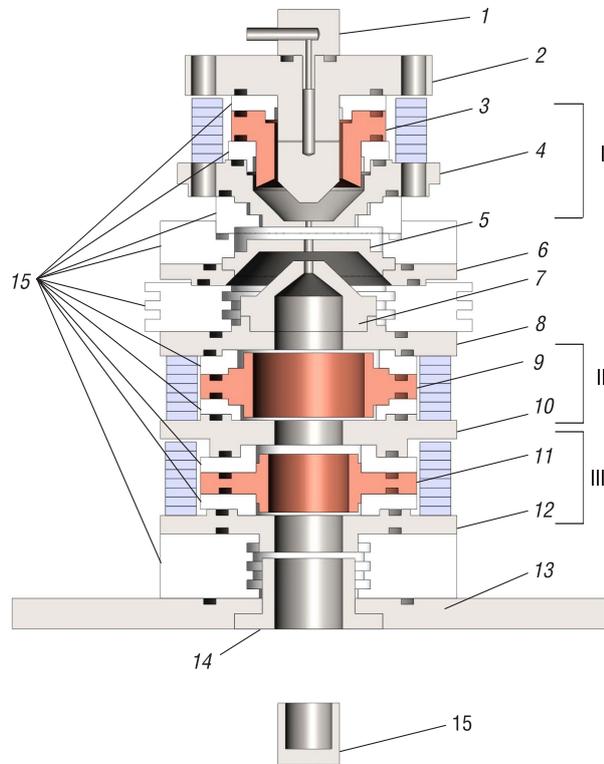


Рис. 1. Электродная структура разработанного макета электронно-ионного источника со скрещенными $E \times H$ полями: 1 – штуцер для напуска плазмообразующего газа; 2 – внутренний катод; 3 – главный анод; 4 – внешний катод; 5 – эмиттерный электрод; 6 – вспомогательный анод; 7 – ускоряющий электрод; 8, 10, 12 – катоды; 9, 11 – аноды; 13 – фланец для установки структуры на рабочую камеру; 14 – согласующий электрод; 15 – изоляторы; I, II, III – области разрядных камер

Fig. 1. Appearance and internal structure of the developed layout electron-ion source with crossed $E \times H$ fields: 1 – fitting for plasma gas inlet; 2 – internal cathode; 3 – the main anode; 4 – external cathode; 5 – emitter electrode; 6 – auxiliary anode; 7 – accelerating electrode; 8, 10, 12 – cathodes; 9, 11 – anodes; 13 – flange for mounting the structure on the working chamber; 14 – matching electrode, and 15 – insulators; I, II, III – areas of discharge chambers

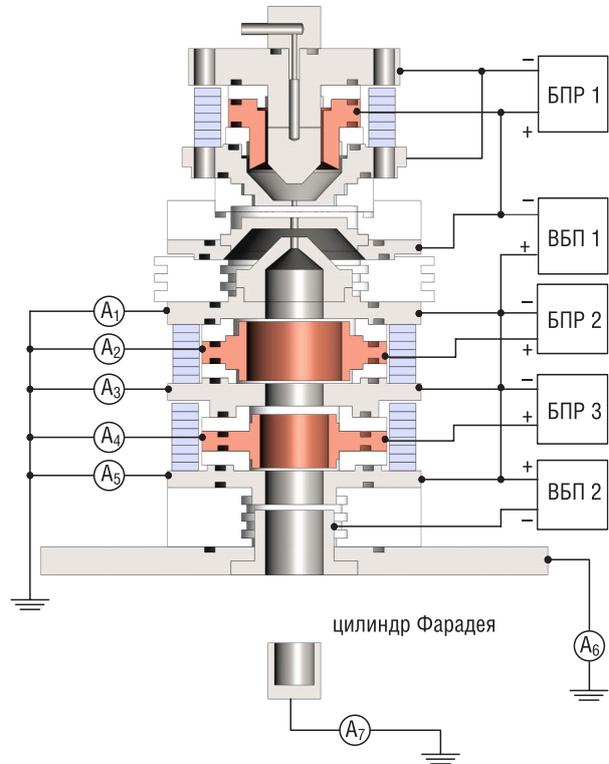


Рис. 2. Схема подключения электродов разрядных камер электронно-ионного источника на основе разряда в скрещенных $E \times H$ полях: БПР – блок питания разряда соответствующей разрядной (I, II или III) камеры с напряжением разряда U_p до 1 кВ и током I_p до 1,2 А; ВБП – высоковольтный блок питания с ускоряющим напряжением U_a до 5 кВ и током до 0,5 А; ВБП 1 – блок ускорения электронов; ВБП 2 – блок ускорения ионов; A_1 – A_7 – амперметры

Fig. 2. Diagram of the connection of the electrodes of the discharge chambers of the electron-ion source based on discharge in crossed $E \times H$ fields: БПР – power supply unit of the corresponding discharge (I, II, or III) camera with discharge voltage U_d up to 1 kV and current I_d up to 1.2 A; ВБП – high-voltage power supply unit with accelerating voltage U_{ac} up to 5 kV and current up to 0.5 A; ВБП 1 – electron acceleration unit; ВБП 2 – ion acceleration unit; A_1 – A_7 – ammeters

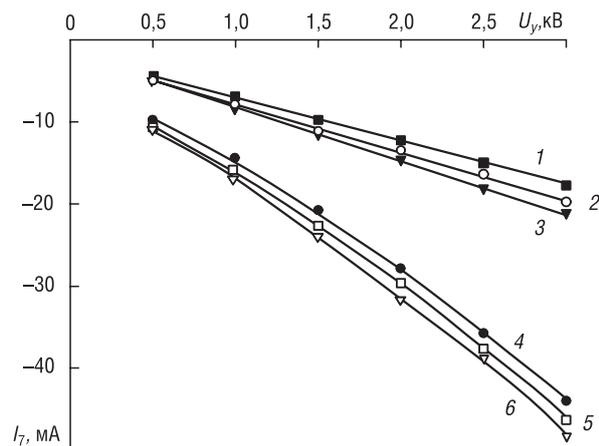


Рис. 3. Ток I_7 (в цилиндр Фарадея) при отсутствии (1–3) и наличии (4–6) инициации разряда в разрядной камере II для различных напусков газа Q : I_p в камере I (см. рис. 1) 200 мА, напряжение горения разряда 420 В; I_p в камере II (см. рис. 1) 180 мА, напряжение горения разряда 410 В. Напуск газа Q : 1, 4 – $1,1 \text{ мПа} \cdot \text{м}^3/\text{с}$; 2, 5 – $2,2 \text{ мПа} \cdot \text{м}^3/\text{с}$; 3, 6 – $3,5 \text{ мПа} \cdot \text{м}^3/\text{с}$

Fig. 3. Current I_7 (into the Faraday cylinder) in the absence of (1–3) and the presence of (4–6) initiation discharge in discharge chamber II: I_d in chamber I (see Fig. 1) is 200 mA, the discharge voltage of the discharge is 420 V; I_d in chamber II (see Fig. 1) is 180 mA, and the discharge voltage of the discharge is 410 V. Gas inlet Q : 1, 4 – $1.1 \text{ mPa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$; 2, 5 – $2.2 \text{ mPa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$; 3, 6 – $3.5 \text{ mPa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$

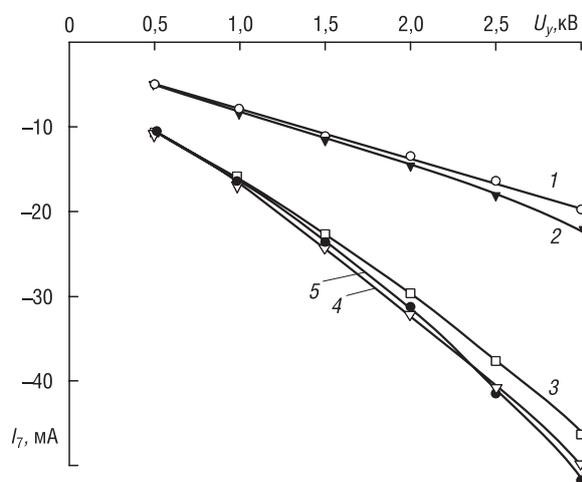


Рис. 4. Ток I_7 (в цилиндр Фарадея) при отсутствии (1, 2) и наличии (3–5) инициации разряда в разрядной камере II для различных токов разряда: I_p в камере I (см. рис. 1): 1, 3, 5 – 200 мА, напряжение горения разряда 420 В; 2, 4 – 240 мА, напряжение горения разряда 450 В; I_p в камере II (см. рис. 1): 3, 4 – 180 мА, напряжение горения разряда 410 В; 5 – 210 мА, напряжение горения разряда 430 В. Напуск газа Q – $1,1 \text{ мПа} \cdot \text{м}^3/\text{с}$

Fig. 4. Current I_7 (to the Faraday cup) in the absence of (1, 2) and the presence of (3–5) discharge initiation in the discharge chamber II for various discharge currents: I_d in the chamber I (see Fig. 1) 1, 3, 5 – 200 mA, discharge burning voltage 420 V; 2, 4 – 240 mA, discharge voltage 450 V; I_d in the chamber II (see Fig. 1): 3, 4 – 180 mA, discharge burning voltage 410 V; 5 – 210 mA, discharge burning voltage of 430 V. Gas inlet Q – $1.1 \text{ mPa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$

формировать различные режимы работы всего источника в целом. Проведенные испытания показали перспективность следующих режимов работы: при иницировании разряда в двух разрядных камерах (см. рис. 1, камеры I и II) в режиме извлечения электронов и при одновременном формировании пучка электронов и ионов.

Так, иницирование разряда в двух разрядных камерах (см. рис. 1, камеры I и II) в режиме извлечения электронов свидетельствует о перспективности применения подобных структур в качестве прототипов высокоперевансных плазменных источников электронов. Предполагается следующий механизм работы в таком режиме: электронный пучок, формируемый в камере I и попадающий после ускорения в структуру, образованную электродами камеры II, распространяется вдоль оси в этой структуре и иницирует разряд низкого давления, в результате чего формируется плазма, эмитирующая ионы. Ионы распространяются в верхнюю структуру, повышают ионизацию газа в области отбора электронов и плотность эмиссионного тока и частично компенсируют объемный заряд ускоряющего промежутка, что приводит к увеличению первеанса источника. Об этом свидетельствует изменение наклона вольтамперных характеристик извлечения при наличии (рис. 3, кривые 4–6; рис. 4, кривые 3–5) инициации разряда в разрядной камере II (см. рис. 1) макета источника в сравнении с его отсутствием (рис. 3, кривые 1–3; рис. 4, кривые 1, 2). Вид характеристик свидетельствует о слабом влиянии на первеанс источника величины тока разряда и напуска газа (давления в разрядной камере) в рабочем диапазоне устойчивого существования разряда. Из представленных характеристик видно, что определяющее действие на первеанс источника оказывает наличие дополнительного разряда в камере II (см. рис. 1).

На рис. 5 представлены вольтамперные характеристики извлечения при одновременном формировании пучка электронов и ионов для двух режимов. В первом режиме (рис. 5, кривая 1) фиксировалось напряжение блока ускорения ионов (см. рис. 2, ВВП 2) на уровне 1,5 кВ и варьировалось напряжение блока ускорения электронов (см. рис. 2, ВВП 1). Во втором режиме (рис. 5, кривая 2) фиксировалось напряжение ускорения электронов на уровне 1,5 кВ, а варьировалось напряжение ускорения ионов.

В случае фиксированного напряжения ускорения ионов на участке I (рис. 5, кривая 1) реализуется практически полная компенсация электронного пучка в диапазоне от 0 до 1,5 кВ, и ток в цилиндр Фарадея близок к нулевому значению. При превышении ускоряющего электроны напряжения 1,5 кВ ток в цилиндр Фарадея повышается, однако он (рис. 5, область II на кривой 1) ниже значения тока эмиссии при инициации разряда в разрядных камерах I и II (см. рис. 3, кривая 2) и подаче ускоряющего электроны напряжения.

При фиксации напряжения ускорения электронов на уровне 1,5 кВ и варьировании напряжения ускорения ионов (рис. 5, область I, кривая 2) ток в цилиндр Фарадея претерпевает скачкообразное изменение полярности в области напряжения ускорения ионов 1,5 кВ, что свидетельствует о взаимной компенсации электронного и ионного пучков до этого значения и преобладающей эмиссии из источника ионов при напряжениях выше фиксированного напряжения ускорения электронов 1,5 кВ. Значение тока эмиссии ионов при напряжении 3 кВ составляет 45 мА, а плотность тока эмиссии ионов – порядка 10 мА/см², полученные значения указывают на перспективность разработки на базе данной конструкции электронно-ионного источника для промышленной реализации различных технологий обработки и модификации поверхностей материалов.

Необходимо отметить, что на рис. 5 в области I существует область неопределенности полярности тока эмиссии, что обусловлено, по-видимому, наличием в разрядных структурах II и III (см. рис. 1) двойных электрических слоев. При ускоряющих напряжениях более 1,5 кВ в области II (рис. 5) поле двойных электрических слоев оказывает уже слабое влияние на движение зарядов в газоразрядных структурах II и III (см. рис. 1), а токи электронов I_{e7} и ионов I_{i7} (рис. 5) имеют определенные значения. Исследования проводились для достаточно широкого диапазона значений напусков газа 1,1–3,5 мПа·м³/с и токов разряда 0,18–0,24 А. Полученные результаты оказались подобны представленным характеристикам и на рисунках не приводятся. Линейный вид вольтамперных характеристик обеспечивает высокую управляемость технологическими характеристиками источника. Наличие дополнительных разрядных структур и соответствующих систем электропитания усложняет конструкцию источника, однако однозначность влияния напряжения в дополнительных блоках питания на характеристики извлечения источника в целом позволяет создать общую согласованную автоматизированную систему управления. Приведенные характеристики свидетельствуют о возможности разработки технологического источника заряженных частиц для реализации технологий, требующих комбинированного воздействия электронными и ионными пучками.

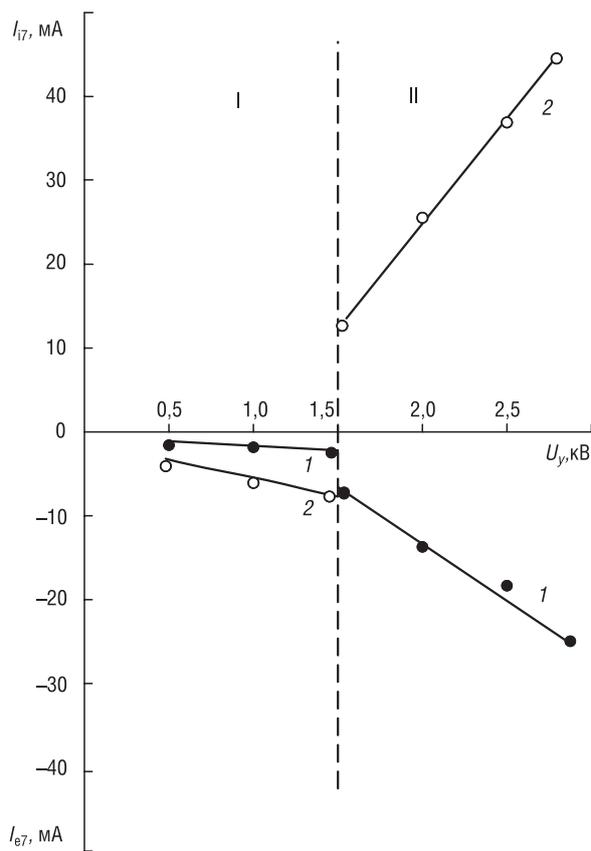


Рис. 5. Ток I_7 (в цилиндр Фарадея): I_{e7} – электронный ток в цилиндр Фарадея; I_{i7} – ионный ток в цилиндр Фарадея; 1 – фиксированное напряжение ускорения ионов 1,5 кВ (см. рис. 2, ВБП 2); 2 – фиксированное напряжение ускорения электронов 1,5 кВ (см. рис. 2, ВБП 1); ток разряда в камере I (см. рис. 1) 200 мА, напряжение горения разряда 420 В; ток разряда в камере II (см. рис. 1) 180 мА, напряжение горения разряда 410 В

Fig. 5. Current I_7 (into the Faraday cylinder): I_{e7} – electron current in the Faraday cylinder; I_{i7} – ionic current in the Faraday cylinder; 1 – fixed ion acceleration voltage of 1.5 kV (see Fig. 2, ВБП 2); 2 – fixed electron acceleration voltage of 1.5 kV (see Fig. 2, ВБП 1); the discharge current in chamber I (see Fig. 1) is 200 mA, and the burning voltage of the discharge is 420 V; the discharge current in chamber II (see Fig. 1) is 180 mA, and the discharge voltage of the discharge is 410 V

Заклучение. Представленная в данной статье конструкция плазменного источника заряженных частиц далеко не исчерпывает весь спектр возможных технологических и конструктивных решений, а только показывает потенциальные возможности такого типа источников для решения актуальных задач формирования технологических электронных и ионных пучков с целью реализации электронно-лучевого ассистирования плазмохимическим процессам или комбинированного воздействия электронными и ионными пучками. Предложенная конструкция может служить прототипом технологических источников, формирующих скомпенсированные ионные пучки, пучки нейтральных атомов, или для реализации попеременного либо одновременного воздействия пучками обоих типов заряженных частиц. Такого типа источники могут стать уникальным универсальным инструментом для нанесения пленочных покрытий различного назначения. Подобные системы могут представлять интерес и как отдельные источники, и как ячейки мультитразрядного источника для формирования воздействия на большие площади [8].

Список использованных источников

1. Физика и технология плазменных эмиссионных систем / под общ. ред. В.Т. Барченко. – СПб.: Изд-во С.-Петербург. гос. электротехн. ун-та «ЛЭТИ», 2014. – 286 с.
2. Кузьмичёв, А.И. Магнетронные распылительные системы / А.И. Кузьмичёв. – Киев: Аверс, 2008. – Кн. 1: Введение в физику и технику магнетронного распыления. – 244 с.
3. Окс, Е.М. Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения / Е.М. Окс. – Томск: Изд-во науч.-техн. лит., 2005. – 216 с.
4. Universal plasma electron source / V. A. Gruzdev [et al.] // *Vacuum*. – 2005. – Vol. 77, iss. 4. – P. 399–405. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2004.05.007>
5. Крейндел, Ю.Е. Плазменные источники электронов / Ю.Е. Крейндел. – М.: Атомиздат, 1977. – 144 с.
6. Ремпе, Н.Г. Промышленное применение электронных пушек с плазменным катодом / Н.Г. Ремпе // *Плазменная эмиссионная электроника: тр. II Междунар. Крейнделевского семинара, г. Улан-Удэ, 17–24 июня 2006 г.* – Улан-Удэ: Изд-во Бурят. науч. центра СО РАН, 2006. – С. 108–112.
7. Plasma emission systems for electron and ion-beams technologies / D. A. Antonovich [et al.] // *High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes*. – 2017. – Vol. 21, iss. 2. – P. 143–159. <https://doi.org/10.1615/HighTempMatProc.2017024672>
8. Бугаев, С.П. Электронные пучки большого сечения / С.П. Бугаев, Ю.Е. Крейндел, П.М. Щанин. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 112 с.

References

1. Barchenko V. T., ed. *Physics and Technology of Plasma Emission Systems*. St.-Petersburg, Publ. House of SPbGETU “LETI”, 2014. 286 p. (in Russian).
2. Kuzmichyov A. I. *Magnetron Sputtering Systems. Book 1. Introduction to the Physics and Technology of Magnetron Sputtering*. Kiev, Avers Publ., 2008. 244 p. (in Russian).
3. Oks E. M. *Sources of Electrons with a Plasma Cathode*. Tomsk, Scientific and Technical Literature Publ. House, 2005. 216 p. (in Russian).
4. Gruzdev V. A., Zaleski V. G., Antonovich D. A., Golubev Y. P. Universal plasma electron source. *Vacuum*, 2005, vol. 77, iss. 4, pp. 399–405. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2004.05.007>
5. Kreindel’ Yu. E. *Plasma Electron Sources*. Moscow, Atomizdat Publ., 1977. 144 p. (in Russian).
6. Rempe N. G. Industrial application of electron guns with a plasma cathode. *Plazmennaya emissionnaya elektronika: trudy II Mezhdunarodnogo Kreindelevskogo seminar, g. Ulan-Ude, 17–24 iyunya 2006 g.* [Plasma Emission Electronics: Proceedings of the International Kreindel Seminar, Ulan-Ude, June 17–24, 2006]. Ulan-Ude, Publ. House of the Buryat Scientific Center of the SB RAS, 2006, pp. 108–112 (in Russian).
7. Plasma emission systems for electron and ion-beams technologies / D. A. Antonovich [et al.] // *High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes*. – 2017. – Vol. 21, iss. 2. – P. 143–159. <https://doi.org/10.1615/HighTempMatProc.2017024672>
8. Bugaev S. P., Kreindel’ Yu. E., Shchanin P. M. *Large-Section Electron Beams*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 112 p. (in Russian).

Информация об авторах

Антонович Дмитрий Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой энергетики и электроники, Полотский государственный университет (ул. Блохина, 30, 211440, Новополоцк, Витебская обл., Республика Беларусь). E-mail: d.antonovich@psu.by

Information about the authors

Dmitry A. Antonovich – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Energy and Electronics, Polotsk State University (30, Blokhin Str., 211440, Novopolotsk, Vitebsk Region, Republic of Belarus). E-mail: d.antonovich@psu.by

Груздев Владимир Алексеевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физики, Полоцкий государственный университет (ул. Блохина, 30, 211440, Новополоцк, Витебская обл., Республика Беларусь). E-mail: v.gruzdev@psu.by

Залесский Виталий Геннадьевич – доктор физико-математических наук, доцент, директор Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси (ул. Академика Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: V.Zalesski@mail.ru

Солдатенко Павел Николаевич – старший преподаватель кафедры физики, Полоцкий государственный университет (ул. Блохина, 30, 211440, Новополоцк, Витебская обл., Республика Беларусь). E-mail: p.soldatenko@psu.by

Vladimir A. Gruzdev – D. Sc. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Physics, Polotsk State University (30, Blokhin Str., 211440, Novopolotsk, Vitebsk Region, Republic of Belarus). E-mail: v.gruzdev@psu.by

Vitali G. Zalesski – D. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Director of the Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Academician Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: V.Zalesski@mail.ru

Pavel N. Soldatenko – Senior Lecturer, Department of Physics, Polotsk State University (30, Blokhin Str., 211440, Novopolotsk, Vitebsk Region, Republic of Belarus). E-mail: p.soldatenko@psu.by

В. Г. Шепелевич¹, О. В. Гусакова², С. В. Гусакова¹, Е. С. Метто¹

¹*Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь*

²*Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь*

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА БЫСТРОЗАТВЕРДЕВАЮЩЕЙ ФОЛЬГИ СПЛАВА Sn – 14 ат.% In – 6,5 ат.% Zn

Аннотация. Представлены результаты исследований влияния сверхвысоких скоростей охлаждения расплава, равных 10^5 К/с, на фазовый состав, микроструктуру, зеренную структуру и механические свойства сплава Sn – 14 ат.% In – 6,5 ат.% Zn. Для изготовления образцов использовался метод сверхбыстрой закалки из расплава. Капля расплава инжигировалась на внутреннюю поверхность быстровращающегося медного цилиндра и затвердевала в виде фольги, толщиной 30–90 мкм. Исследования фазового состава, проведенные методом рентгеноструктурного анализа, позволили установить, что фольга состоит из твердого раствора цинка в γ -фазе (Sn_4In) и цинка. Наблюдения за микроструктурой фольги с помощью растровой электронной микроскопии показали, что при комнатной температуре протекает распад пересыщенного твердого раствора с выделением дисперсных частиц цинка. Методом дифракции обратно отраженных электронов изучен характер зеренной структуры и текстуры фольги. Предложен механизм формирования зерен вытянутой формы, заключающийся в том, что при высокой скорости затвердевания, сравнимой со скоростью движения расплава по поверхности кристаллизатора, рост зерен может происходить не только в направлении, противоположном направлению теплоотвода, но и в направлении движения расплава. Формирование преимущественного роста зерен, у которых наиболее плотноупакованная плоскость (0001) параллельна поверхности фольги, обеспечивает максимальную скорость понижения энтальпии сплава в процессе кристаллизации. Выявлены особенности влияния микроструктуры и зеренной структуры на механические свойства фольги. Микротвердость быстрозатвердевающего сплава Sn – 14 ат.% In – 6,5 ат.% Zn составляет 105 МПа. Кривая растяжения фольги сплава Sn – 14 ат.% In – 6,5 ат.% Zn, полученная при комнатной температуре, имеет вид, характерный для кривой растяжения металлов при высокой температуре, что обусловлено низкой температурой плавления γ -фазы.

Ключевые слова: высокоскоростное затвердевание, олово, индий, цинк, микроструктура, механические свойства

Для цитирования: Структура и свойства быстрозатвердевающей фольги сплава Sn – 14 ат.% In – 6,5 ат.% Zn / В. Г. Шепелевич [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2020. – Т. 65, № 3. – С. 292–298. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-292-298>

Vasiliy G. Shepelevich¹, Olga V. Gusakova², Sofia V. Gusakova¹, Ekaterina S. Metto¹

¹*Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus*

²*International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus*

STRUCTURE AND PROPERTIES OF RAPIDLY SOLIDIFYING FOILS Sn – 14 at.% In – 6.5 at.% Zn

Abstract. The results of studies of the effect of ultra-high cooling rates of the melt equal to 10^5 K/s on the phase composition, microstructure, grain structure and mechanical properties of the Sn – 14 at.% In – 6.5 at.% Zn alloy are presented. To prepare the samples, the rapid quenching from the melt technique was used. A drop of melt was injected onto the inner surface of a rapidly rotating copper cylinder and solidifying in the form of a foil with a thickness of 30–90 μm . Investigations of the phase composition, carried out by the method of X-ray diffraction analysis, made it possible to establish that the foil consists of a solid solution of zinc in the γ -phase (Sn_4In) and zinc. Observations of the microstructure of the foil using scanning electron microscopy showed that the decomposition of a supersaturated solid solution proceeds at room temperature with the release of dispersed zinc particles. The character of the grain structure and texture of the foil is studied by the electron backscatter diffraction technique. A mechanism of the formation of elongated grains is proposed, which consists in the fact that at a high solidification rate, comparable to the rate of movement of the melt over the surface of the mold, grain growth can occur not only in the direction opposite to the direction of heat removal, but also in the direction of movement of the spreading. The formation of the preferred growth of grains, in which the most closely-packed plane (0001) is parallel to the foil surface, provides the maximum rate of decrease in the enthalpy of the alloy during crystallization. The features of the influence of the microstructure and grain structure on the mechanical properties of the foil are revealed. The microhardness of the rapidly solidifying Sn – 14 at.% In – 6.5 at.% Zn alloy is 105 MPa. The stress–strain curve of the Sn – 14 at.% In – 6.5 at.% Zn foil, obtained at room temperature, has a shape specific for the stress–strain curve of metals at high temperatures, which is due to the low melting point of the γ -phase.

Keywords: high-speed solidification, tin, indium, zinc, microstructure, mechanical properties

For citation: Shepelevich V. G., Gusakova O. V., Gusakova S. V., Metto E. S. Structure and properties of rapidly solidifying foils Sn – 14 at.% In – 6.5 at.% Zn. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 3, pp. 292–298 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-292-298>

Введение. Решение Европейского союза и ряда стран о запрете поставки и продажи бытовой электроники, в которой использованы припои, содержащие ртуть, кадмий, свинец и другие компоненты, опасные для окружающей среды и здоровья человека, привели к необходимости разработки новых сплавов припоев. В настоящее время эта проблема решается применением припоев на основе эвтектических сплавов (Sn–Bi, Sn–Ag, Sn–Zn, Sn–Ag–Cu и др.), а также сплавов, близких по составу к эвтектическим. К числу легкоплавких сплавов, используемых в качестве припоев, относится сплав Sn – 14,2 ат.% Zn. Однако он склонен к окислению из-за высокой концентрации цинка.

В данной работе рассматривается сплав, содержащий не только цинк, но и индий, при определенной концентрации которого основной фазой является не β -олово, а металлическая γ -фаза (Sn₄In), чья структура и физические свойства исследованы недостаточно [1]. Однако из-за высокой стоимости индия для получения припоя с более низкой ценой целесообразно использовать ресурсо- и энергосберегающие технологии, к которым относится высокоскоростное затвердевание [2–4]. Но при сверхвысоких скоростях охлаждения (более 10⁵ K/c) при затвердевании формируется структура, которую невозможно получить обычными технологиями. *Целью работы* является исследование структуры и механических свойств фольги сплава Sn – 14 ат.% In – 6,5 ат.% Zn, полученной высокоскоростным затвердеванием расплава.

Материалы и методика исследования. Сплав Sn – 14 ат. % In – 6,5 ат.% Zn (далее по тексту Sn–14In–6,5Zn) синтезирован сплавлением компонентов чистотой не ниже 99,99 % в кварцевой ампуле. Расплав заливался в графитовую изложницу и кристаллизовался в виде стержня длиной 12 см и поперечным сечением 25 мм². Затем образец сплава массой \approx 0,15 г расплавляли и инжигировали на внутреннюю полированную поверхность быстровращающегося медного цилиндра диаметром 20 см. Капля растекалась по поверхности кристаллизатора и затвердевала в виде образца фольги длиной до 15 см и шириной до 10 мм. Для исследования использовались образцы толщиной 30–90 мкм. Скорость охлаждения расплава, достигаемая при сверхбыстрой закалке из жидкого состояния, как показал расчет [4], не ниже 10⁵ K/c.

Исследование микроструктуры полученных образцов осуществлялось методом растровой электронной микроскопии на микроскопе LEO 1455VP, имеющем приставки для рентгеноспектрального микроанализа и исследования зеренной структуры, в том числе и построения прямых полюсных фигур. Фазовый состав фольги определялся методом рентгеноструктурного анализа с использованием дифрактометра ДРОН-3. Параметры микроструктуры установлены методами металлографического анализа [5]. Микротвердость образцов измерена на приборе ПМТ-3 с использованием нагрузки 10 г. Относительная погрешность измерения микротвердости составила 4 %. Испытания на растяжение проводились с помощью разрывной машины Testometric M350-10 ST при комнатной температуре.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. В фольге сплава Sn–14In–6,5Zn поверхность, прилегающая к кристаллизатору, имеет блестящий вид. На ней образуются раковины микронных размеров. Противоположная сторона фольги имеет выступы и впадины.

На дифрактограмме фольги сплава Sn–14In–6,5Zn наблюдаются дифракционные отражения γ -фазы (Sn₄In) 0001, 10 $\bar{1}$ 0, 10 $\bar{1}$ 1, 11 $\bar{2}$ 0, 0002 и др., имеющей простую гексагональную кристаллическую решетку. Кроме того, обнаружены слабые дифракционные отражения цинка 0002, 10 $\bar{1}$ 0, 1122 и др.

Изображения микроструктуры фольги сплава через 5 и 50 ч выдержки после изготовления при комнатной температуре представлены на рис. 1. Серый цвет соответствует γ -фазе, а дисперсные черные выделения – цинку. Металлографический анализ показал, что средний размер частиц цинка и их количество на поверхности фольги увеличивается со временем выдержки при комнатной температуре. Их появление и рост вызваны распадом пересыщенного твердого раствора цинка в γ -фазе. При этом средняя величина объемной доли цинка за время от 5 до 25 ч увеличилась с 0,015 по 0,079, а удельная поверхность межфазной границы – с 0,22 мкм⁻¹ по 0,93 мкм⁻¹.

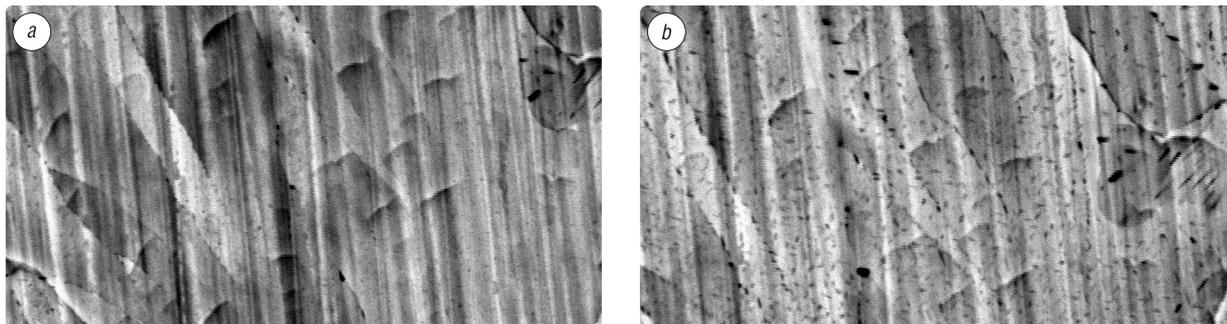


Рис. 1. Микроструктура поверхности фольги сплава Sn–14In–6,5Zn, после 5 ч (а) и 50 ч (б) выдержки при комнатной температуре

Fig. 1. Microstructure of the surface of the foil of the Sn–14In–6.5Zn alloy, after 5 h (a), and 50 h (b) of exposure at room temperature

Легирование быстрозатвердевающей фольги γ -фазы цинком оказывает сильное влияние на размер зерен. Изображения зеренной структуры фольги γ -фазы и сплава Sn–14In–6,5Zn представлено на рис. 2. Жирными черными линиями выделены большеугловые границы зерен, тонкими линиями – малоугловые границы зерен. Вытянутая форма зерен наблюдается как для фольги γ -фазы, так и для фольги сплава Sn–14In–6,5Zn, однако при добавлении цинка среднее отношение длины зерна к его ширине уменьшается от 2,8 до 1,9. Наибольшее влияние цинк оказывает на площадь зерен, приводя к уменьшению их средней площади на два порядка: от 1830 мкм² для γ -фазы до 20 мкм² для сплава Sn–14In–6,5Zn.

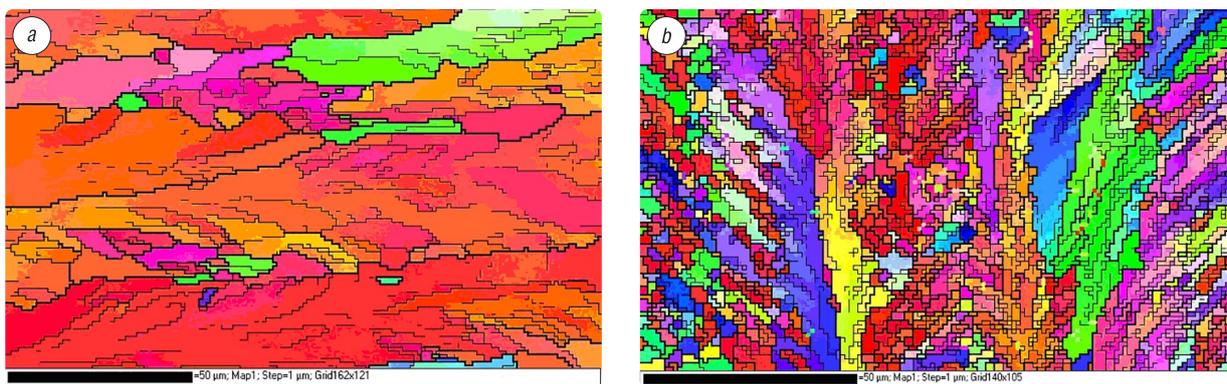


Рис. 2. Зеренная структура быстрозатвердевающей фольги: а – γ -фазы, б – сплава Sn–14In–6,5Zn

Fig. 2. Grain structure of rapidly solidifying foil: a – γ -phase, b – Sn–14In–6.5Zn alloy

Вытянутая форма зерен в быстрозатвердевающей фольге, очевидно, обусловлена высокой скоростью роста зерен сплава на основе γ -фазы, сравнимой со скоростью движения расплава по поверхности кристаллизатора. В этом случае затвердевание может происходить при движении фронта границы раздела расплав – твердое тело не только в направлении, противоположном направлению теплоотвода (от стороны фольги, прилегающей к кристаллизатору, к свободно затвердевающей стороне), но и в направлении движения расплава.

Образование крупных вытянутых в направлении движения расплава зерен способствует формированию большого количества их малоугловых границ. В быстрозатвердевающей фольге наблюдается высокая плотность малоугловых границ зерен с углом разориентации больше 2° и меньше 10° . Результаты исследования разориентации зерен сплава Sn–14In–6,5Zn, полученные при автоматической обработке данных о зеренной структуре программой дифракционной приставки фазового анализа, приведены на рис. 3.

На диаграмме распределения углов разориентации соседних зерен (рис. 3, а) наблюдается высокая удельная плотность (I) в области углов меньше 10° . Диаграмма распределения углов разориентации между случайно выбранными зёрнами, представленная на рис. 3, б, показывает

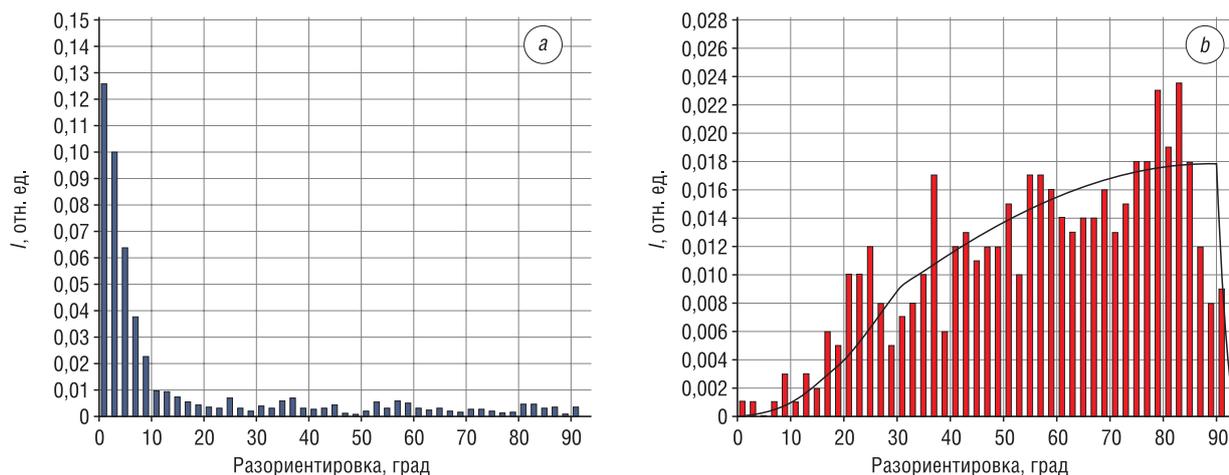


Рис. 3. Гистограммы углов разориентации зерен фольги сплава Sn–14In–6,5Zn по размерным группам: *a* – соседние зерна, *b* – случайно выбранные зерна

Fig. 3. Histograms of the misorientation angles of the grains of the foil of the Sn–14In–6.5Zn alloy by size groups: *a* – neighboring grains, *b* – randomly selected grains

распределение, близкое к теоретически рассчитанному хаотичному распределению углов между зернами (сплошная линия). Эти данные подтверждают высокую плотность малоугловых границ зерен. Следует отметить, что не в каждом сечении зерна наблюдаются сечения малоугловых границ. В большинстве случаев малоугловые границы наблюдаются в крупных зернах.

Нами исследовано образование текстуры в образцах быстрозатвердевающей фольги сплава Sn–4In–6,5Zn. На рис. 4 представлены прямые полюсные фигуры плоскостей (0001), $10\bar{1}0$ и $10\bar{1}2$ при проекциях на плоскость XY, соответствующую поверхности фольги. На данных фигурах максимальная полюсная плотность (темная область) наблюдается для плоскости (0001) и совпадает со стереографической проекцией нормали к поверхности фольги. Это указывает на большую площадь зерен, у которых плоскость (0001) параллельна поверхности фольги, что означает формирование текстуры (0001).

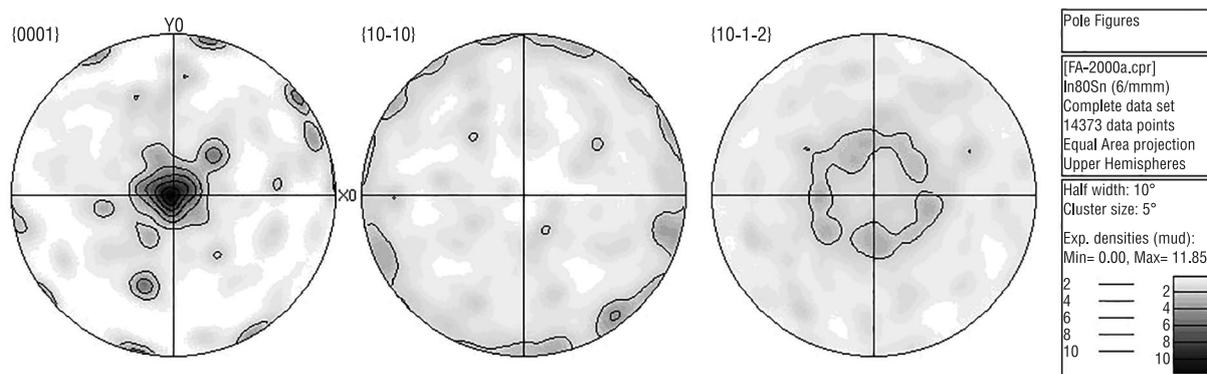


Рис. 4. Прямые полюсные фигуры плоскостей (0001), $10\bar{1}0$ и $10\bar{1}2$ γ -фазы в фольге сплава Sn–14In–6,5Zn

Fig. 4. Direct pole figures of the (0001), $10\bar{1}0$, and $10\bar{1}2$ planes of the γ -phase in the Sn–14In–6.5Zn alloy foil

Известно [6, 7], что в быстрозатвердевающей фольге алюминия, свинца и их сплавов формируется (111) текстура, вызванная преимущественным ростом зерен, у которых плоскости (111) перпендикулярны тепловому потоку [8]. Образование текстуры в образцах фольги исследуемого сплава объясняется в рамках теории необратимых процессов. Из-за глубокого переохлаждения расплав находится в состоянии со значительным избытком энтальпии. Согласно принципу максимальной скорости работы сил диссипации, рассмотренному Г. Циглером [9], переход расплава в равновесное состояние протекает таким образом, чтобы скорость понижения энтальпии сплава в процессе кристаллизации была максимальной. Поэтому направление кристаллизации, совпадающее

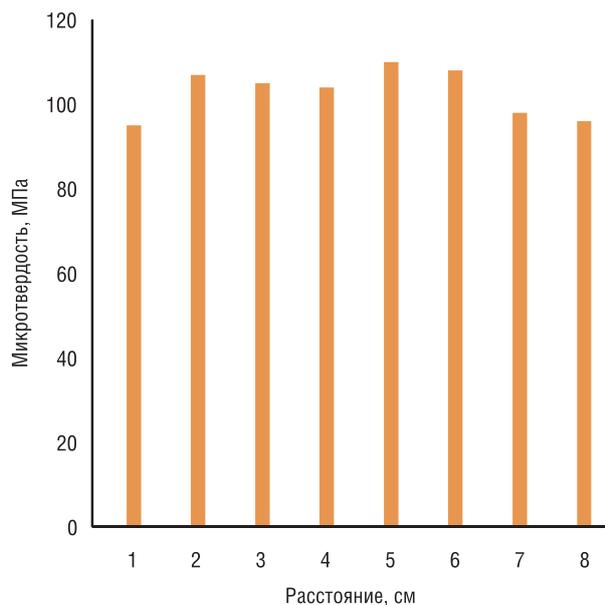


Рис. 5. Зависимость микротвердости (H_{μ}) от расстояния вдоль фольги сплава Sn–14In–6,5Zn

Fig. 5. Dependence of microhardness (H_{μ}) on the distance along the foil of the Sn–14In–6.5Zn alloy

ния γ -фазы [1]. Максимальное напряжение 31 МПа достигается при относительной деформации фольги 0,4 %, а относительное удлинение составляет 10 %, то есть исследуемый сплав является достаточно пластичным. При деформации более 10 % в фольге наблюдается образование и рост трещин, что объясняет быстрое уменьшение нагрузки при растяжении [12].

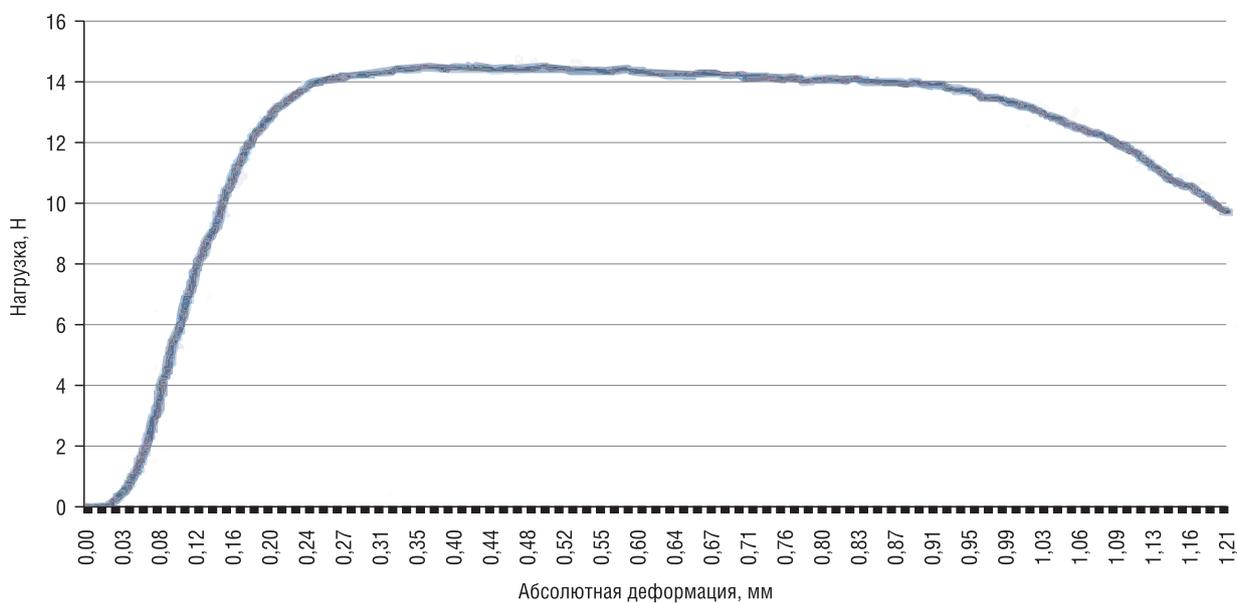


Рис. 6. Кривая растяжения фольги сплава Sn–14In–6,5Zn

Fig. 6. The tensile curve of the foil of the Sn–14In–6.5Zn alloy

Фольга сплава Sn–14In–6,5Zn успешно использовалась при пайке отдельных узлов сенсорного выключателя: микроконтроллера AT42QT1011, Attiny 13a-SO8 SMD, резисторов 1J 0805 и 1K 0603 и др. Припой имел светло матовую поверхность и характеризовался стабильностью механических характеристик в течение испытательного срока службы изделий, составившего 6 мес.

с направлением теплоотвода, должно быть перпендикулярным наиболее плотноупакованным плоскостям, которые перемещаются с наибольшей скоростью. Такой плоскостью в γ -фазе (Sn_4In) является плоскость (0001).

Распределение микротвердости (H_{μ}) фольги сплава Sn–14In–6,5Zn вдоль исследуемого образца фольги длиной около 100 мм приведено на рис. 5. Зависимость H_{μ} характеризуется незначительным максимумом, ее максимальное значение 105 МПа достигается в средней части образца. Исследования показали, что концентрация цинка не изменяется по длине образца фольги. Однако для сплавов с высокой растекаемостью форма и размер зерен могут несколько изменяться по длине образца фольги, как, например, для сплавов на основе олова [10].

Кривая растяжения фольги сплава Sn–14In–6,5Zn, полученная при комнатной температуре, представлена на рис. 6. Она имеет вид, характерный для кривой растяжения металлов при высокой температуре [11], что обусловлено низкой температурой плавления

Выводы. Таким образом, фольга сплава Sn–14In–6,5Zn, полученная высокоскоростным охлаждением из расплава, состоит из γ -фазы (Sn₄In) и дисперсных частиц цинка, распределенных однородно в γ -фазе. Фольга имеет микрокристаллическую структуру, в ней образуется текстура (0001). Определены механические свойства быстрозатвердевающей фольги: $H_{\mu} = 110$ МПа, $\delta = 10\%$, $\sigma_{\max} = 31$ МПа. Фольга сплава Sn–14In–6,5Zn может применяться в качестве ультратемпературного припоя в электронной промышленности.

Список использованных источников

1. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник: в 3 т. / под ред. Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 2001. – Т. 1. – 872 с.
2. Высокоскоростное затвердевание расплавов: (теория, технология и материалы) / В.А. Васильев [и др.]. – М.: СП «Интермет инжиниринг», 1998. – 400 с.
3. Мирошниченко, И.С. Закалка из жидкого состояния / И.С. Мирошниченко. – М.: Metallurgiya, 1982. – 168 с.
4. Шепелевич, В.Г. Быстрозатвердевшие легкоплавкие сплавы / В.Г. Шепелевич. – Минск: БГУ, 2015. – 192 с.
5. Салтыков, С.А. Стереометрическая металлография / С.А. Салтыков. – М.: Metallurgiya, 1970. – 272 с.
6. Texture of rapidly solidified foils of aluminium and its alloys / V.G. Shepelevich [et al.] // J. Alloys Compd. – 2005. – Vol. 403, № 1–2. – P. 267–269. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2004.07.089>
7. Шахрай, О.Н. Текстура быстрозатвердевших фольг свинца и его сплавов / О.Н. Шахрай, В.Г. Шепелевич // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2004. – № 3. – С. 32–34.
8. Li, D. Y. A possible role for surface packing density in the formation of {111} texture in solidified FCC metals / D. Y. Li, J. A. Szpunar // J. Mater. Sci. Lett. – 1994. – Vol. 13, № 21. – P. 1521–1523. <https://doi.org/10.1007/BF00626496>
9. Циглер, Г. Экстремальные принципы термодинамики необратимых процессов в механике сплошной среды / Г. Циглер. – М.: Мир, 1966. – 136 с.
10. Gusakova, O. The influence of melt flow on grain structure of tin and its alloys produced by ultrafast quenching from the melt / O. Gusakova, V. Shepelevich // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 192. – P. 012015-1-6. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/192/1/012015>
11. Бернштейн, М.Л. Структура деформированных металлов / М.Л. Бернштейн. – М.: Metallurgiya, 1977. – 432 с.
12. Структура и механические свойства быстрозатвердевших фольг сплава Sn – 14 ат. % In – 6,5 ат.% Zn / В.Г. Шепелевич [и др.] // Приборостроение-2017: материалы 10-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 1–3 нояб. 2017 г. – Минск: БНТУ, 2017. – С. 244–246.

References

1. Lyakishev N. P., ed. *State Diagrams of Binary Metal Systems: a Reference. Vol. 1.* Moscow, Mashinostroenie Publ., 2001. 872 p. (in Russian).
2. Vasil'ev V. A., Mitin B. S., Pashkov I. N., Serov N. M., Skuridin A. A., Lukin A. A., Yakovlev V. B. *High-speed Solidification of Melts (Theory, Technology and Materials)*. Moscow, Intermet inzhiniring Publ., 1998. 400 p. (in Russian).
3. Miroshnichenko I. S. *Quenching from a Liquid State*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1982. 168 p. (in Russian).
4. Shepelevich V. G. *Fast Solidified Fusible Alloys*. Minsk, Belarusian State University, 2015. 192 p. (in Russian).
5. Saltykov S. A. *Stereometric Metallography*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1970. 272 p. (in Russian).
6. Shepelevich V. G., Siutsova P. A., Neumerzhytskaya E. Yu., Gutko E. S., Kuckorecko K. V. Texture of rapidly solidified foils of aluminium and its alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 2005, vol. 403, no. 1–2, pp. 267–269. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2004.07.089>
7. Shakhrai O. N., Shepelevich V. G. The texture of rapidly solidified foils of lead and its alloys. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2004, no. 3, pp. 32–34 (in Russian).
8. Li D. Y., Szpunar J. A. A possible role for surface packing density in the formation of {111} texture in solidified FCC metals. *Journal of Materials Science Letters*, 1994, vol. 13, no. 21, pp. 1521–1523. <https://doi.org/10.1007/BF00626496>
9. Ziegler H. *Some Extremum Principles in Irreversible Thermodynamics with Application to Continuum Mechanics*. Amsterdam, North-Holland, 1963. VII + 193 s.
10. Gusakova O., Shepelevich V. The influence of melt flow on grain structure of tin and its alloys produced by ultrafast quenching from the melt. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 192, p. 012015-1-6. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/192/1/012015>
11. Bernshtejn M. L. *Structure of Deformed Metals*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1977. 432 p. (in Russian).
12. Shepelevich V. G., Metto Ye. S., Gusakova S. V., Gusakova O. V. Structure and mechanical properties rapidly solidified foils of the Sn – 14 at.% In – 6.5 at.% Zn. *Priborostroenie-2017: materialy 10-i Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, Minsk, 1–3 noyabrya 2017 g.* [Instrument Making-2017: Materials of the 10th International Scientific and Technical Conference, Minsk, November 1–3, 2017]. Minsk, BNTU, 2017, pp. 244–246 (in Russian).

Информация об авторах

Шепелевич Василий Григорьевич – доктор физико-математических наук, профессор, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: Shepelevich@bsu.by. <https://orcid.org/0000-0002-5899-1690>

Гусакова Ольга Вадимовна – кандидат физико-математических наук, доцент, Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова БГУ (ул. Долгобродская, 23, 220070, Минск, Республика Беларусь). E-mail: Ol.gusakova@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-9796-4476>

Гусакова София Викторовна – кандидат физико-математических наук, ведущий инженер, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: husakova@bsu.by. <https://orcid.org/0000-0003-0366-0584>

Метто Екатерина Сергеевна – студент, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: Kmetto@mail.ru

Information about the authors

Vasily G. Shepelevich – D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Belarussian State University (4, Nezavisimosti Ave., Minsk, 220030, Republic of Belarus). E-mail: Shepelevich@bsu.by. <https://orcid.org/0000-0002-5899-1690>

Olga V. Gusakova – Ph. D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, International Sakharov Environmental Institute of Belarussian State University (23, Dolgobrodskaya Str., Minsk, 220070, Republic of Belarus). E-mail: Ol.gusakova@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-9796-4476>

Sofia V. Gusakova – Ph. D. (Physics and Mathematics), Lead Engineer, Belarussian State University (4, Nezavisimosti Ave., Minsk, 220030, Republic of Belarus). E-mail: husakova@bsu.by. <https://orcid.org/0000-0003-0366-0584>

Ekaterina S. Metto – Student, Belarussian State University (4, Nezavisimosti Ave., Minsk, 220030, Republic of Belarus). E-mail: Kmetto@mail.ru

С. М. Азаров¹, Д. Н. Балыдко²¹*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*
²*ООО «АГАТ-СИСТЕМ», Минск, Республика Беларусь***ФОРМИРОВАНИЕ МЕМБРАННОГО СЛОЯ С КАРБИДОМ КРЕМНИЯ
НА АЛЮМОСИЛИКАТНОЙ ПОДЛОЖКЕ**

Аннотация. Представлены результаты исследования особенностей формирования на крупнопористой подложке SiC-содержащего слоя из предварительно обработанных в бисерной мельнице продуктов размола фарфорового боя с антрацитом (10 мас.%). Показано, что легирование алюмосиликатного порошка углеродом приводит к образованию в спеченном материале карбида кремния кубической и гексогональной модификации (муассанит). Основным источником кремния для образования SiC при спекании легированного порошка $Al_2O_3-SiO_2$ является кварц. Процесс образования SiC при температурах 850–950 °C становится возможным благодаря формированию структурных дефектов на поверхности и в объеме механоактивированных частиц фарфора; частичному переходу в более активное, аморфное состояние хрупкого SiO_2 (всегда присутствующего в виде зерен в структуре размалываемых алюмосиликатных частиц) при легировании углеродом. Процесс изготовления многослойных образцов-трубок включал в себя прессование и спекание крупнопористой алюмосиликатной подложки при температуре 1200–1250 °C с последовательным нанесением и термообработкой промежуточного и мембранного слоев. Установлено, что при 950 °C формирование мембранного слоя из механически активированного порошка $Al_2O_3-SiO_2-C$ с размером частиц менее 1 мкм сопровождается образованием SiC в количестве 36 %. Определены структурные и фильтрующие характеристики полученных трехслойных трубчатых образцов с SiC-содержащим мембранным слоем: размер пор 0,4–0,5 мкм; производительность по воде 0,012 м³/м²·с; степень задерживания частиц размером менее 0,5 мкм, в том числе микроорганизмов, – 100 %. Экспериментально показано, что при фильтрации трехслойные образцы характеризуются практически постоянным фильтроциклом.

Ключевые слова: алюмосиликатная керамика, карбид кремния, мембранный слой, крупнопористая подложка, характеристики

Для цитирования: Азаров, С. М. Формирование мембранного слоя с карбидом кремния на алюмосиликатной подложке / С. М. Азаров, Д. Н. Балыдко // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, №3. – С. 299–309. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-299-309>

Siarhei M. Azarau¹, Denis N. Balydko²¹*Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus*
²*JSC “AGAT-SISTEM”, Minsk, Republic of Belarus***FORMATION OF A MEMBRANE LAYER WITH SILICON CARBIDE ON AN ALUMINOSILICATE
SUBSTRATE**

Abstract. The paper presents the results of a study of the formation features on a large-pore substrate of a SiC-containing layer of pre-processed in a bead mill products of grinding porcelain fight with anthracite (10 wt.%). It is shown that the alloying of aluminosilicate powder with carbon leads to the formation of cubic and hexagonal silicon carbide (moissanite) in the sintered material. The main source of silicon for the formation of SiC when sintering doped powder $Al_2O_3-SiO_2$, is quartz. The process of SiC formation at temperatures of 850–950 °C becomes possible due to the formation of structural defects on the surface and in the volume of mechanically activated porcelain particles; partial transition to a more active, amorphous state of brittle SiO_2 (always present as grains in the structure of milled aluminosilicate particles) when doped with carbon. The process of manufacturing multilayer tube samples included pressing and sintering of a large-pore aluminosilicate substrate at a temperature of 1200–1250 °C with successive application and heat treatment of the intermediate and membrane layers. It was found that at 950 °C, the formation of a membrane layer from a mechanically activated $Al_2O_3-SiO_2-C$ powder with a particle size of less than 1 μm is accompanied by the formation of SiC in an amount of 36 %. The structural and filtering characteristics of the obtained three-layer tubular samples with a SiC-containing membrane layer were determined: the pore size of 0.4–0.5 microns; water capacity of 0.012 m³/m²·s; the degree of retention of particles smaller than 0.5 microns, including microorganisms, – 100 %. It is shown experimentally that three-layer samples are characterized by an almost constant filter cycle during filtration.

Keywords: aluminosilicate ceramics, silicon carbide, membrane layer, large-porous substrate, characteristics

For citation: Azarau S. M., Balydtko D. N. Formation of a membrane layer with silicon carbide on an aluminosilicate substrate. *Vestsi Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 3, pp. 299–309 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-299-309>

Введение. Прогресс пищевой и фармацевтической отраслей промышленности сопряжен с развитием микрофильтрационных процессов, обеспечивающих стерилизацию и осветление всех видов напитков и лекарственных препаратов.

Микрофильтрация – процесс наиболее близкий к обычной фильтрации. Фильтрующие материалы с размерами пор 0,05–20,0 мкм используются для отделения частиц в эмульсиях и суспензиях. Микрофильтрация позволяет эффективно задерживать частицы размером от 0,01 до 1,0 мкм, которые практически не осаждаются в поле гравитационных сил [1].

Карбид кремния является одним из базовых компонентов для создания керамических материалов, используемых в микрофильтрационных процессах. Это связано с характерным для SiC сочетанием свойств: химическая инертность, высокая температура плавления, механическая прочность, абразивная стойкость и др. В то же время стоимость карбидокремниевых фильтроэлементов в виде труб высока и составляет 250–300 долл. США за штуку. Стоимость в основном определяется сложностью и энергоемкостью технологических операций формирования SiC (температуры выше 1400 °С в сочетании с динамическим вакуумом и др. [2]). Поэтому для уменьшения энергетических затрат и упрощения технологических приемов представляется перспективным использование реакционного спекания микрофильтрационных слоев с формированием SiC на дешевой крупнопористой подложке.

Известно, что образование карбида кремния в условиях промышленного получения происходит при достаточно сложном взаимодействии углерода с диоксидом кремния. Существует ряд технологических приемов, позволяющих существенно снизить температуру формирования SiC [3–5]. Одним из способов образования карбидокремниевой матрицы при пониженных температурах является реакционное спекание исходных компонентов, прошедших предварительную импульсную обработку взрывом, механоактивацию [6] и др., причем характерным признаком такого процесса является отсутствие усадки [7].

Целью работы явилось изучение влияния SiC, образующегося при спекании мелкодисперсного алюмосиликатного порошка, легированного углеродом, на структурные и фильтрующие характеристики получаемой пористой керамики.

В ходе исследования авторами решались следующие задачи:

изучить особенности формирования SiC в процессе спекания мембранных слоев из легированного углеродом алюмосиликатного порошка;

определить структурные и фильтрующие характеристики получаемой многослойной керамики.

Материалы и методики исследований. Для приготовления шихты в качестве алюмосиликата использовали продукт размола фарфорового боя ЗАО «Добрушский фарфоровый завод». Источником углерода служил антрацит (фильтрующая загрузка, используемая для очистки воды). Исходные компоненты обрабатывали в бисерной мельнице. Содержание антрацита в смеси составляло 10 мас.%. После размола частицы размером более 1 мкм удаляли седиментацией для того, чтобы при спекании получить материал с размером пор менее 0,5 мкм [8]. Распределение частиц по размерам после измельчения определяли на фотоседиментометре ФСХ-4. Для измерения величин объемной усадки, прочности на сжатие и пористости использовали экспериментальные образцы в виде цилиндров диаметром 16 мм и высотой 16 мм. Коэффициент проницаемости, размер пор, качество очистки жидкостей определяли на многослойных трубках диаметром 12 мм, длиной 100 мм с толщиной стенки 2 мм. Длительность межрегенерационных циклов исследовали на трубках диаметром 65 мм и длиной 70 мм. Многослойную структуру трубок формировали нанесением на предварительно спеченную крупнопористую алюмосиликатную подложку промежуточного слоя из алюмосиликатного порошка ($Al_2O_3-SiO_2$) и мембранных слоев из алюмосиликатных частиц, легированных углеродом ($Al_2O_3-SiO_2-C$). Спекание экспериментальных образцов проводили в лабораторной печи на воздухе.

Способ получения, давление прессования экспериментальных образцов и температуры их спекания представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. **Технологические режимы изготовления образцов**

Table 1. **Technological modes of sample production**

Вид образца	Способ получения	Давление прессования, МПа	Температура спекания/термообработки, °С
Цилиндр	Прессование с последующим спеканием	40	850, 900, 950
Крупнопористая подложка трубки		30	1200–1250
Промежуточный слой трубки	Окунание с последующей термообработкой	–	1050, 1100, 1150
Мембрана трубки			850, 900, 950

Рентгенофазовый анализ проводили на образцах мембранных слоев, снятых с экспериментальных трубок. Характеристики образцов (пористость, коэффициент проницаемости и др.), дифференциально-термический (ДТА), рентгеноспектральный, рентгенофазовый анализы и морфологию поверхности разрабатываемых материалов исследовали по стандартным методикам, принятым в порошковой металлургии и материаловедении. Изучение элементного состава проводили на аттестованном сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения Miра фирмы Tescan (Чехия) с микрорентгеноспектральным анализатором INCA Energy 350 фирмы Oxford Instruments Analytical (Великобритания). Погрешность метода составила 10–15 %.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Совместный размол компонентов в бисерной мельнице позволил установить следующее. Времени размолта 60 мин, как и 180 мин, недостаточно, так как остается большой процент частиц размером более 2 мкм (рис. 1, *a, b*), что является препятствием для создания пористой структуры с порами менее 0,5 мкм. При размолте в течение 360 мин (рис. 1, *c*) количество частиц с размером ~ 2 мкм минимально.

Значения объемной усадки при спекании, прочности при сжатии, пористости образцов исследуемых материалов представлены в табл. 2.

Результаты рентгенофазового анализа исходного порошка и мембранных слоев, спеканных при температуре 950 °С, приведены на рис. 2 и в табл. 3.

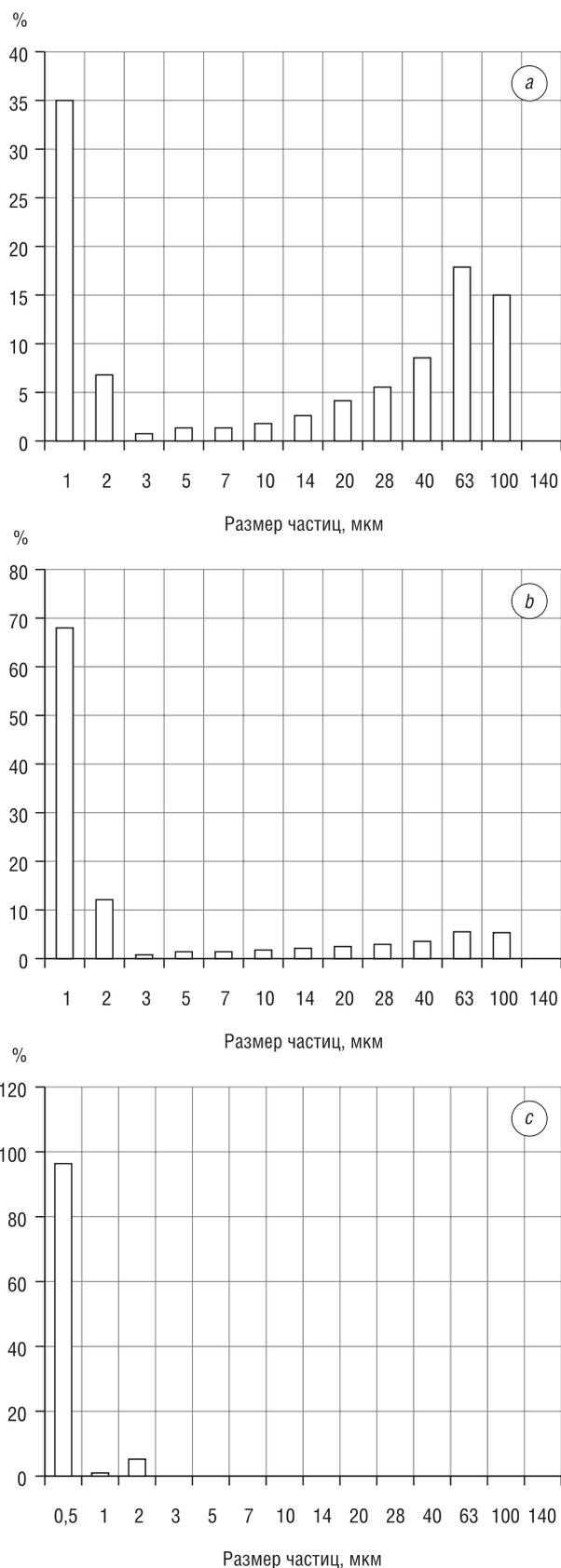


Рис. 1. Распределение частиц по размерам при размолте в течение 60 мин (*a*), 180 мин (*b*), 360 мин (*c*)

Fig. 1. Particle size distribution during milling for 60 min (*a*), 180 min (*b*), 360 min (*c*)

Таблица 2. Характеристики цилиндрических алюмосиликатных образцов

Table 2. Characteristics of cylindrical aluminosilicate samples

Al ₂ O ₃ -SiO ₂			
Температура спекания, °С	1050	1100	1150
Прочность при сжатии, МПа	7,5	9,6	12,9
Пористость, %	35,3	32,4	28,6
Объемная усадка, %	10,9	14,1	17,3
Al ₂ O ₃ -SiO ₂ -C			
Температура спекания, °С	850	900	950
Прочность при сжатии, МПа	5,1	7,4	10,1
Пористость, %	37,3	36,8	36,1
Объемная усадка, %	4	6	6,5

ном материале карбида кремния кубической модификации в количестве 31 % и гексогональной (муассанит) – 4 %. Присутствие некоторого количества карбида кремния в спеченном материале из исходного алюмосиликатного порошка можно объяснить использованием органического пластификатора (5 % поливинилового спирта), используемого при формовании образцов и в процессе формирования мембранного слоя на крупнопористой подложке.

Как следует из данных табл. 3, основным источником кремния для образования SiC при спекании легированного порошка Al₂O₃-SiO₂ является кварц. В спеченном материале Al₂O₃-SiO₂-C его содержание уменьшилось на 35,7 % при мало изменившейся концентрации орторомбического силлиманита (≈ 11 %).

Дифрактограмма порошка, легированного углеродом, не отличается от дифрактограммы исходного порошка (см. рис. 2). Это связано с аморфностью антрацита. В [9] доказано, что составляющие каменных углей представляют собой смесь различных рентгеноаморфных компонентов, присутствие и количество которых меняется в ряду метаморфизма.

Изображения микроструктур поверхностей исходного порошка и мембранного слоя из Al₂O₃-SiO₂-C с данными микрорентгено-спектрального анализа (МРСА) представлены на рис. 3, 4.

Анализ результатов рентгенофазового анализа, представленных в табл. 3, показывает, что легирование алюмосиликатного порошка углеродом приводит к образованию в спечен-

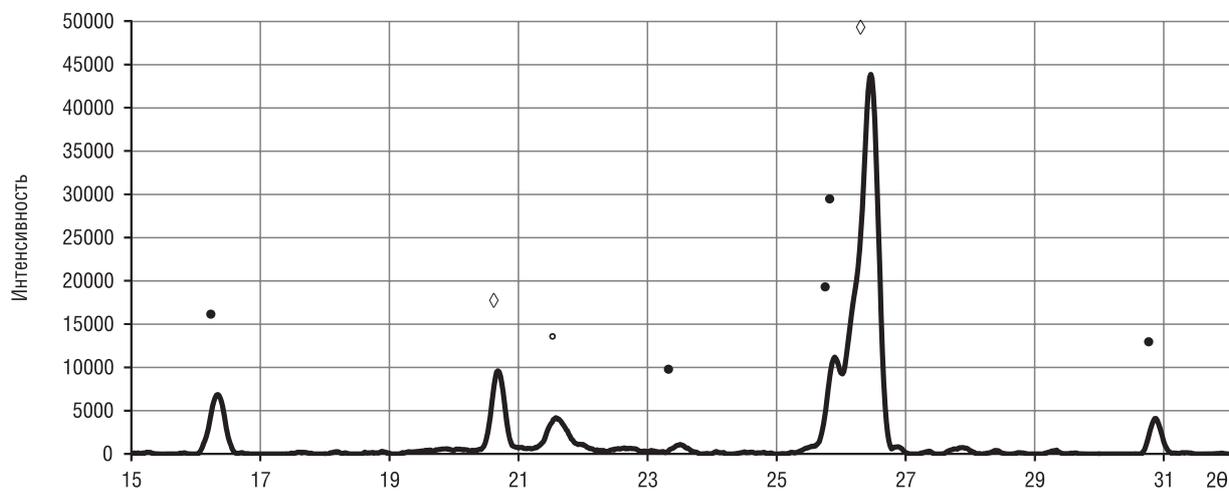


Рис. 2. Дифрактограмма исходного алюмосиликатного порошка (● – муллит, ◇ – кварц, ○ – кристобалит)

Fig. 2. Diffraction pattern of the original aluminosilicate powder (● – mullite, ◇ – quartz, ○ – cristobalite)

Таблица 3. Фазовый состав мембранных слоев после спекания при 950 °С

Table 3. Phase composition of membrane layers after sintering at 950 °С

Образец	Фазовый состав, %				
	Кварц SiO ₂ (гексогональный)	Силлиманит Al ₂ SiO ₅ (орторомбический)	Корунд Al ₂ O ₃ (ромбоэдрический)	Карбид кремния SiC	
Al ₂ O ₃ -SiO ₂	56	27	10	7 гексогональный	
Al ₂ O ₃ - SiO ₂ -C	36	24	5	4 гексогональный (муассанит)	31 кубический (муассанит)

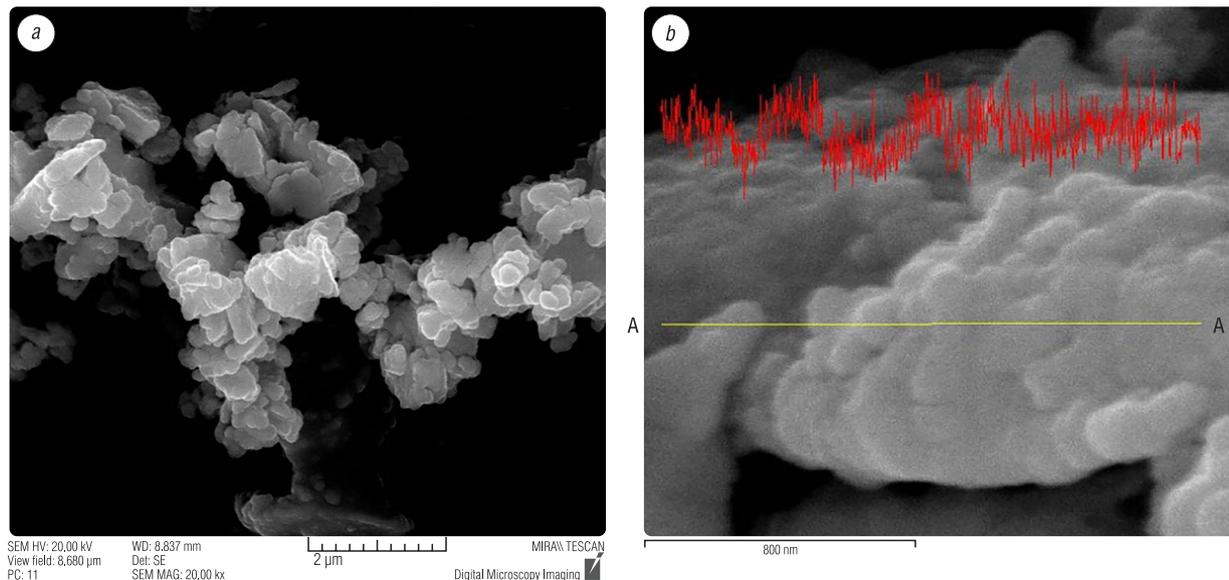
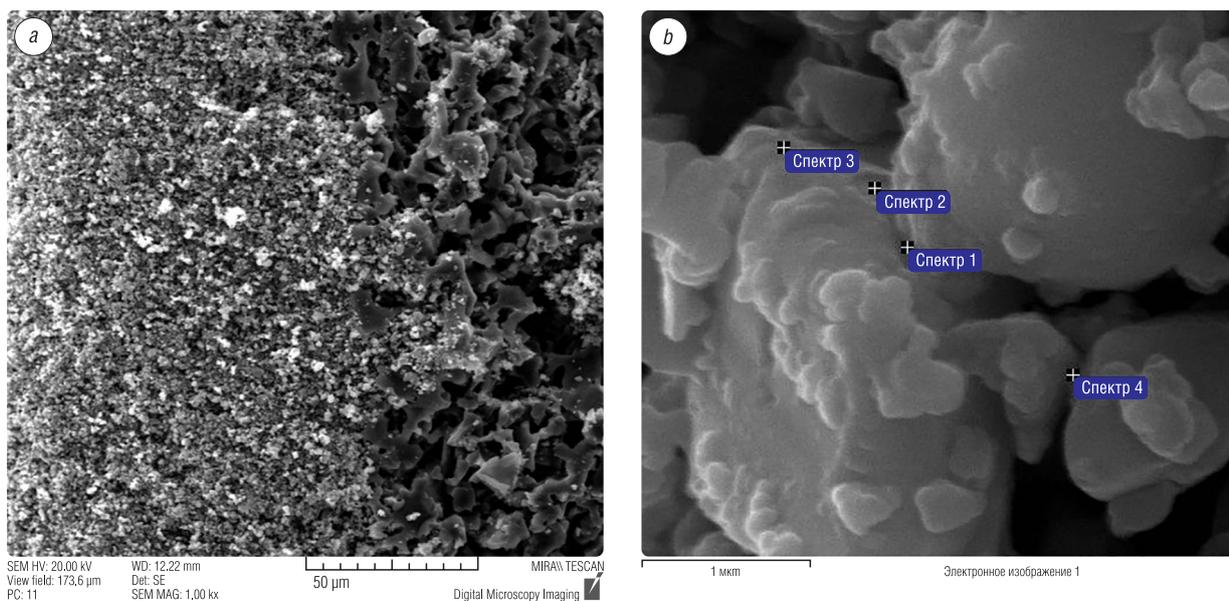


Рис. 3. Структура поверхности порошка $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, легированного углеродом, после размол и седиментации (a) с распределением концентрации углерода на отрезке AA (b)

Fig. 3. Surface structure of powder $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, doped with carbon, after grinding and sedimentation (a) with carbon concentration distribution on the segment AA (b)



Содержание элементов, %	C	O	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe
Спектр 1	10,36	Остальное	0,16	8,74	22,06	1,24	0,40	0,17
Спектр 2	5,48	—//—	0,16	8,61	19,80	1,11	0,35	0,19
Спектр 3	11,33	—//—	0,08	8,77	18,87	0,95	0,38	0,12
Спектр 4	10,10	—//—	0,16	7,97	23,67	1,22	0,57	0,50

Рис. 4. Структура излома мембранного слоя, спеченного из порошка $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-C}$ (a), с расположением точек МРСА на поверхности (b) и содержанием элементов (таблица)

Fig. 4. Fracture structure of the membrane layer sintered from $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-C}$ powder (a), with the location of MRSA points on the surface (b) and the content of elements (table)

Можно предположить, что процесс образования SiC при температурах спекания мембранного слоя (850–950 °C) становится возможным благодаря формированию структурных дефектов на поверхности и в объеме механоактивированных частиц фарфора; частичному переходу в более активное, аморфное состояние хрупкого SiO_2 (всегда присутствующего в виде зерен в структуре

размалываемых алюмосиликатных частиц) при легировании углеродом [10]. Кроме того, представляется вероятным образование микрочастиц карбида кремния уже в процессе длительной обработки в бисерной мельнице по механизму твердофазного взаимодействия компонентов.

На рис. 5 представлены результаты дифференциально-термического анализа при спекании исходного алюмосиликатного порошка ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$) и алюмосиликатного порошка, легированного углеродом ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-C}$). Кривые ТГ и ДТГ измерялись по стандартизированным методикам.

Дефектность алюмосиликатных частиц облегчает их взаимодействие с молекулами CO_2 при спекании. Дифференциально-термический анализ (см. рис. 5) свидетельствует, что при

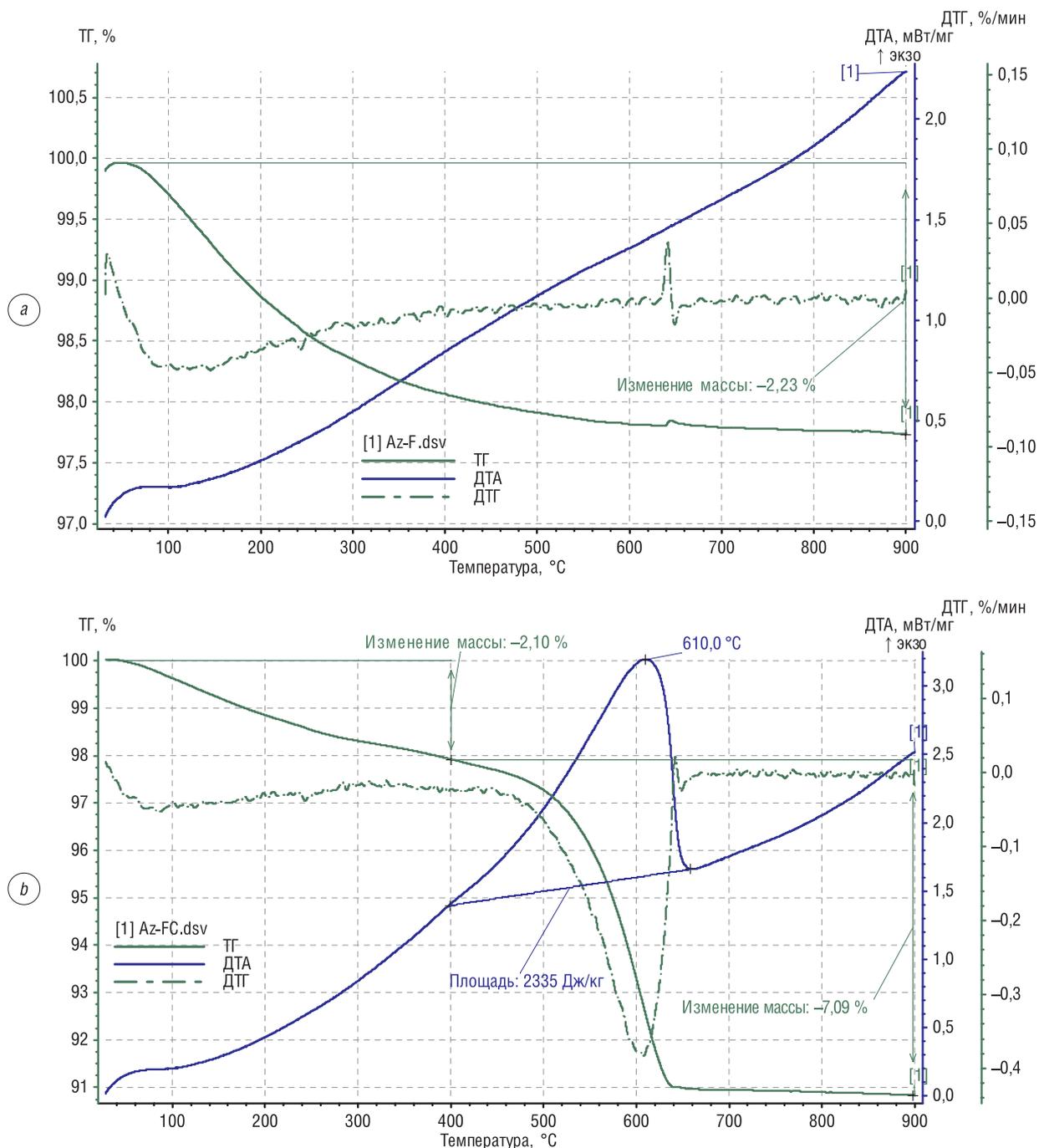


Рис. 5. Дифференциально-термический анализ исследуемых материалов: исходного алюмосиликатного порошка (a) и алюмосиликатного порошка, легированного углеродом (b)

Fig. 5. Differential thermal analysis of the materials under study: initial aluminosilicate powder (a) and aluminosilicate powder doped with carbon (b)

температуре 610 °С наблюдается экзотермический пик, сопровождающийся уменьшением массы на 7 %, обусловленный сгоранием углерода и, следовательно, формированием CO₂. Выделенное при этом в порах значительное количество энергии 2335 Дж/г создает локальный перегрев на поверхности частиц и повышает вероятность формирования карбида кремния, который достаточно равномерно распределен по поверхности пор спеченного мембранного слоя.

Судя по кривой ТГ, убыль массы в образце без углерода составляет 2 %, а в образце с углеродом ~ 9 % при их нагреве до 800 °С. Из этого можно сделать вывод, что в общей сложности выгорает ~ 7 % углерода, а ~ 3 % оставшегося вступает в реакцию с оксидом кремния с образованием карбида кремния. Если учесть, что образец без углерода до 610 °С теряет до 2 % массы, корректно говорить о выгорании 5 % до экзотермического пика при 610 °С и еще в диапазоне температур 610–650 °С

Об этом свидетельствует и эндотермический пик в интервале 630–650 °С, сопровождающийся локальным увеличением плотности (рис. 5, *b*, пик на кривой ДТГ в этом же диапазоне температур). Если учесть, что плотность карбида кремния составляет 3,2 г/см³, а фарфора – 2,15–2,36 г/см³, то образование SiC является следствием экзотермической реакции образования CO₂ в порах мембранного слоя по механизму, описанному выше.

В [11] установлено, что при спекании алюмосиликатных порошков с размерами частиц менее 5 мкм движущей силой процессов контактообразования является поверхностная энергия, которая определяет достаточно большую усадку. Согласно данным табл. 2, спекание алюмосиликатных порошков, легированных углеродом, в исследуемом диапазоне температур (850–950 °С) сопровождается объемной 4–6%-ной усадкой, а промежуточных слоев без легирования – 10–17%-ной усадкой. При этом пористость мембранных слоев достигает 36–37 %. Следовательно, структурные образования карбида кремния затрудняют усадку и создают условия для формирования достаточно высокой пористости.

Нанесение окунанием суспензии из порошка Al₂O₃–SiO₂–C на предварительно спеченную при температуре 1200–1250 °С крупнопористую алюмосиликатную основу с промежуточным слоем из порошка Al₂O₃–SiO₂ приводит к формированию трехслойной структуры с мембранным слоем (рис. 6) без образования трещин.

Сравнение характеристик двухслойных и трехслойных экспериментальных образцов в виде труб диаметром 16 мм, длиной 40–70 и толщиной стенки 4 мм представлено в табл. 4.

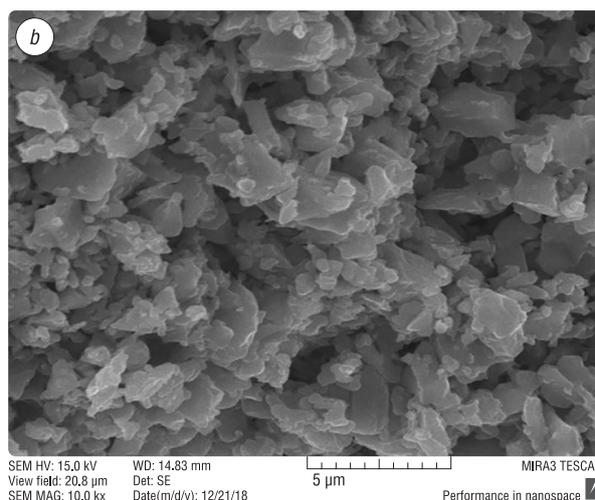
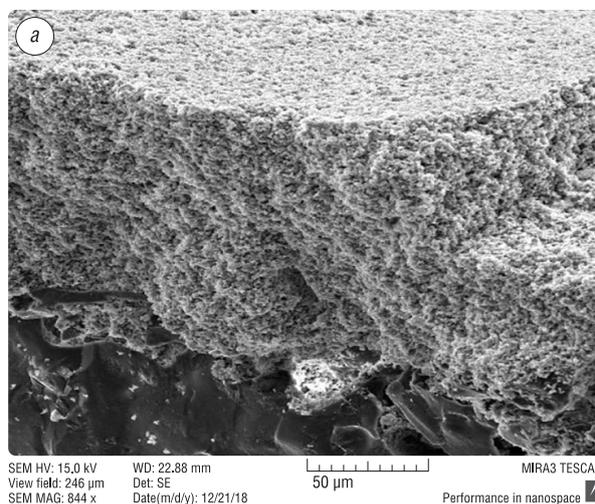


Рис. 6. Излом (*a*) и поверхность (*b*) мембранного слоя из алюмосиликатного порошка, легированного углеродом
Fig. 6. Fracture (*a*) and surface (*b*) of the aluminosilicate membrane layer from carbon-doped powder

Т а б л и ц а 4. Фильтрующие характеристики образцов

T a b l e 4. Filter characteristics of samples

Характеристика	Трубки	
	дву- слойные	трех- слойные
Максимальный размер пор, мкм	25–30	0,8–1,0
Средний размер пор, мкм	5–8	0,4–0,5
Производительность (<i>Q</i>)*, м ³ /м ² ·с	0,07	0,012
Задерживание частиц до 0,5 мкм, %	92	100

* – по водопроводной воде.

Таблица 5. Характеристики сывотки крови до и после фильтрации алюмосиликатными трубками

Table 5. Characteristics of blood serum before and after filtration with aluminosilicate tubes

Образец	Размер пор, мкм	Оптическая плотность	Объем пропущенной сывотки до забивания фильтра, мл
Сыворотка крови до фильтрации	–	0,518	–
Подложка	15	0,348	> 50
Двуслойный	5–8	0,328	> 50
Трехслойный	0,4–0,5	0,222	20
Millipore	0,22	0,220	3

Из данных, представленных в табл. 4, следует, что двуслойный образец имеет средний размер пор 5–8 мкм, производительность по воде до 0,07 м³/(м²·с) и степень задерживания частиц до 92 %. Образец с мембранным слоем характеризуется средним размером пор 0,4–0,5 мкм, производительностью по воде 0,012 м³/(м²·с) и степенью задерживания частиц 100 %.

Результаты осветляющей фильтрации сывотки крови через исследуемые образцы в сравнении с сертифицированным бактерицидным фильтром Millipore (Германия) представлены в табл. 5 и на рис. 7. Эксперименты по тестированию проведены в НИИ экспериментальной ветеринарии им. С. Н. Вышелесского.

Для оценки способности фильтра задерживать микроорганизмы (стерилизующая фильтрация) в качестве физиологического раствора был использован смыв

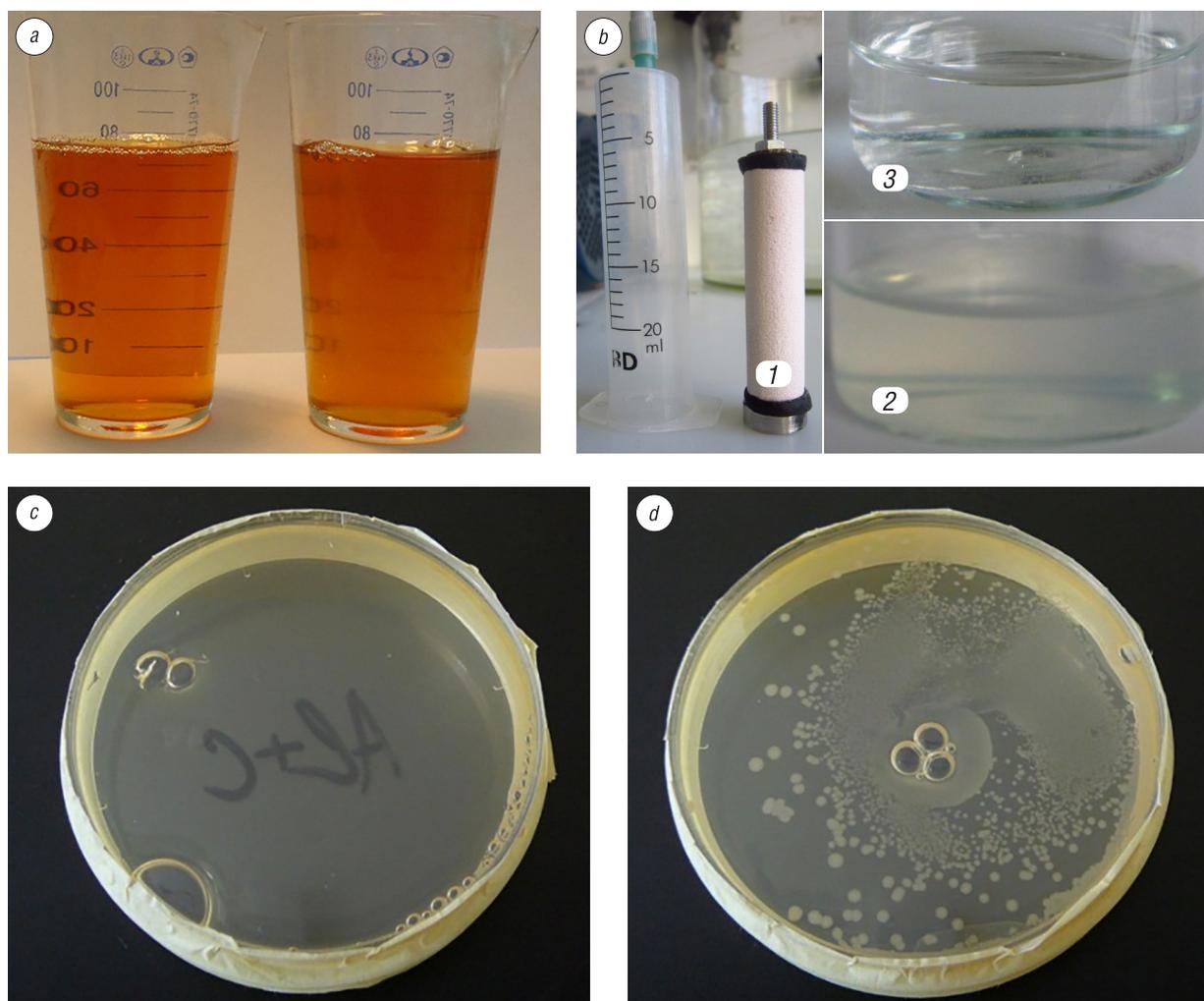


Рис. 7. Биологические жидкости после очистки многослойными трубками: *a* – сывотка крови после трехслойного (слева) и двуслойного (справа) образцов; *b* – трехслойный фильтроэлемент для бактерицидной очистки (1); физиологический раствор до (2) и после (3) фильтрации; рост колоний бактерий в физиологическом растворе после фильтрации двуслойным (*c*) и трехслойным (*d*) образцами

Fig. 7. Biological fluids after cleaning with multilayer tubes: *a* – blood serum after three-layer (left) and two-layer (right) samples; *b* – three-layer filter element for bactericidal cleaning (1); saline solution before (2) and after (3) filtration; growth of bacterial colonies in saline solution after filtration with two-layer (*c*) and three-layer (*d*) samples

24-часовой агаровой культуры бактерий рода *Bacillus*. Бактерии смывали с агара 0,9%-ным раствором NaCl (рН 7,2–7,4). Концентрацию бактериальных клеток в смыве доводили до 1 млрд микробных тел в 1 мл с помощью спектрофотометра Metertech UV/VIS SP 8001, затем осуществляли фильтрацию приготовленной микробной взвеси через трехслойные экспериментальные образцы, конструкция которых представлена на рис. 7, *b* (1). Полученный фильтрат засеивали на плотные питательные среды в объеме 0,1 мл на чашку Петри. Для каждого образца использовали по две чашки. Засеянные чашки помещали в термостат на 24 ч при 36,6 °С, затем проводили подсчет образовавшихся колоний. Чашки, в которых отсутствовал рост, выдерживали в термостате еще 3 сут с последующей проверкой наличия колоний. Результаты экспериментов представлены в табл. 6 и на рис. 7 *c, d*. На рис. 7, *b* приведены вид физиологического раствора до (2) и после (3) стерилизующей фильтрации.

Таблица 6. Оценка стерилизующей способности экспериментальных образцов

Table 6. Evaluation of the sterilizing capacity of experimental samples

Образец	Оптическая плотность		Количество колоний	
	до фильтрации	после фильтрации	1 сут	4 сут
Трехслойный		0,018	Нет	Нет
			--/--	--/--
Двуслойный		0,045	Множественные	--/--
			--/--	--/--
Исходный раствор	0,470		Сплошной рост	

Из представленных результатов следует, что исследуемые трехслойные экспериментальные образцы создают условия для задерживания бактериальных клеток. Установлено, что фильтроэлементы с алюмосиликатными SiC-содержащими мембранными слоями обеспечивают осветление сыворотки крови и стерилизацию физиологического раствора с одновременным увеличением в 1,8–2,5 раза ресурса работы по сравнению с ресурсом работы стерилизующих фильтров Millipore.

Для оценки межрегенерационных периодов (циклограмм) при очистке водопроводной воды использовали экспериментальные образцы трехслойных трубчатых фильтроэлементов диаметром 65 мм и высотой 70 мм. Фильтрация производилась «снаружи–внутри» трубчатого образца, его регенерация – обратным током «изнутри–наружу». Давление при фильтрации и регенерации составляло 0,6 МПа. Регенерацию обратным током осуществляли через определенные промежутки времени. Время регенерации определялось опытным путем и составляло в каждом цикле 25 с.

Результаты экспериментов по регенерации трехслойных образцов сравнивались с результатами по регенерации силикатных двухслойных трубчатых элементов с размером пор 10–20 мкм, традиционно используемых в водоочистке. Сравнение циклограмм позволяет установить, что для трехслойного образца наблюдается практически постоянный фильтроцикл с сохранением производительности, в то время как производительность силикатного фильтроэлемента монотонно убывает. При этом силикатный фильтроэлемент обеспечивает более высокую производительность по сравнению с трехслойным алюмосиликатным.

В то же время наличие мембранного слоя, содержащего карбид кремния, позволяет реализовать качество очистки на уровне стерилизации с возможностью регенерации обратным током. Выявленное преимущество позволит использовать разработанные трехслойные материалы для очистки воды от биологических загрязнений.

Заключение. Показана возможность формирования при 950 °С на пористой алюмосиликатной подложке с промежуточным слоем SiC-содержащего мембранного слоя без трещин. Выявлено, что структурные образования карбида кремния затрудняют усадку и создают условия для формирования материала с высокой пористостью ~ 36 %.

Установлено, что предварительная совместная обработка продукта размола фарфорового боя с антрацитом (10 мас.%) в бисерной мельнице (6 ч) приводит к образованию в спеченном при 950 °С материале карбида кремния в количестве 36 %.

Исследованы особенности формирования SiC в процессе спекания мембранных слоев. Выявлено, что основным источником кремния для образования SiC при спекании порошка $Al_2O_3-SiO_2-C$ является кварц.

Определены структурные и фильтрующие характеристики, полученных трехслойных трубчатых образцов с SiC-содержащим мембранным слоем: размер пор 0,4–0,5 мкм; производительность по воде 0,012 м³/(м²·с); степень задерживания частиц < 0,5 мкм, в том числе микроорганизмов, – 100 %. При фильтрации воды трехслойные образцы характеризуются практически постоянным фильтроциклом и качеством очистки жидкостей на уровне стерилизации.

Список использованных источников

1. Мембранные инженерные системы. Микро- и ультрафильтрация [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://me-system.ru/tehnologii/ultrafiltratsiya>. – Дата доступа: 25.01.2020.
2. Полимерная технология пористой SiC-керамики с использованием измельченных SiO₂-волокон / Е. П. Симоненко [и др.] // Журн. неорганической химии. – 2018. – Т. 63, № 5. – С. 539–549. <https://doi.org/10.7868/S0044457X18050021>
3. Microstructure and Mechanical Properties of Silicon Carbide Sintered with Yttrium-Aluminum Garnet and Silica / Y. Kim [et al.] // J. Am. Ceram. Soc. – 1999. – Vol. 82, № 2. – P. 441–449. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.1999.tb20082.x>
4. Зо Е Мо У. Пористая и высокопористая керамика из оксида алюминия и карбида кремния: дис. ... д-ра техн. наук : 05.17.11 / Зо Е Мо У; Рос. хим.-технол. ун-т им. Д. И. Менделеева. – М., 2019. – 253 л.
5. Кхин Маунг Сое. Композиционная керамика на основе карбида кремния с эвтектическими добавками в системах $Al_2O_3-TiO_2-MnO$, $Al_2O_3-MnO-SiO_2$, $MgO-SiO_2$, $Al_2O_3(MgO)-MgO-SiO_2$: дис. ... канд. техн. наук : 05.17.11 / Кхин Маунг Сое; Рос. хим.-технол. ун-т им. Д. И. Менделеева. – М., 2019. – 110 л.
6. Investigation of features of phase formation in powders forming the $Al_2O_3-SiO_2$, $Al_2O_3-SiO_2$ systems at a sintering process [Electronic resource] / Y. Y. Piatsiushyk [et al.] // Euro PM 2017, Congress & Exhibition, 1–5 October, Milan, Italy. – Mode of access: <https://www.epma.com/publications/euro-pm-proceedings/product/ep17-3685391> – Date of access: 15.05.2020.
7. Регулирование открытой пористости и прочности варьированием зернового состава керамики на основе электроплавленного корунда с фарфоровой связкой / А. В. Беляков [и др.] // Новые огнеупоры. – 2016. – № 2. – С. 34–37.
8. Белов, С. В. Пористые проницаемые материалы: справочник / С. В. Белов. – М.: Металлургия, 1987. – 335 с.
9. Королев, Ю. М. Рентгенографические критерии в установлении подобия фазового состава природных и искусственных углеродистых веществ / Ю. М. Королев, Ю. Л. Моисеев, В. Т. Попов // Накопление и преобразование органического вещества современных и ископаемых осадков: сб. науч. ст. – М.: Наука, 1990. – С. 140–145.
10. Preparation of high-porous SiC ceramics from polymeric composites based on diatomite powder / E. P. Simonenko [et al.] // J. Mater. Sci. – 2015. – Vol. 50, № 2. – P. 733–744. <https://doi.org/10.1007/s10853-014-8633-1>
11. Пористая алюмосиликатная керамика / С. М. Азаров [и др.]. – Минск: Ковчег, 2009. – 258 с.

References

1. *Membrane engineering systems. Micro and ultrafiltration*. Available at: <https://me-system.ru/tehnologii/ultrafiltratsiya> (accessed 25 January 2020) (in Russian).
2. Simonenco E. P., Simonenco N. P., Shembel L. N., Simonov-Emelyanov I. D., Sevostianov W. G., Kusnetsov N. T. Polymer technology of porous SiC ceramics using comminuted SiO₂ fibers. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 2018, vol. 63, no. 5, pp. 574–582. <https://doi.org/10.1134/s0036023618050030>
3. Kim Y., Kim Y.-W., Mitomo M., Zhan G. D., Lee J. G. Microstructure and Mechanical Properties of Silicon Carbide Sintered with Yttrium-Aluminum Garnet and Silica. *Journal of the American Ceramic Society*, 1999, vol. 82, no. 2, pp. 441–449. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.1999.tb20082.x>
4. So E Mo U. *Porous and Highly Porous Aluminum Oxide and Silicon Carbide Ceramics*. Moscow, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, 2019. 253 sheets (in Russian).
5. Kchin Maung Soe. *Composite Ceramics Based on Silicon Carbide with Eutectic Additives in the Systems $Al_2O_3-TiO_2-MnO$, $Al_2O_3-MnO-SiO_2$, $MgO-SiO_2$, $Al_2O_3(MgO)-MgO-SiO_2$* . Moscow, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, 2019. 110 sheets (in Russian).
6. Piatsiushyk Y. Y., Azarava T. A., Guravleva E. S., Krasochko P. P., Balydko D. N. Investigation of features of phase formation in powders forming the $Al_2O_3-SiO_2$, $Al_2O_3-SiO_2$ systems at a sintering process. *Euro PM 2017, Congress & Exhibition, 1–5 October, Milan, Italy*. Available at: <https://www.epma.com/publications/euro-pm-proceedings/product/ep17-3685391> (accessed 15 May 2020).
7. Belyakov A. V., So E Mo U, Popova N. A., Ie Aung Min, Shgo Lvin U. Regulation of open porosity and strength by varying the grain size composition of ceramics based on electrofused corundum with a porcelain binder. *Novye огнеупоры = New Refractories*, 2016, no. 2, pp. 34–37 (in Russian).

8. Belov S. V. *Porous Permeable Materials*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987. 335 p. (in Russian).
9. Korolev Y. M., Moiseev Y. L., Popov V. T. X-ray criteria in establishing the similarity of the phase composition of natural and artificial carbonaceous substances. *Nakoplenie i preobrazovanie organicheskogo veshchestva sovremennykh i iskopaemykh osadkov: sbornik nauchnykh statei* [Accumulation and Transformation of Organic Matter in Modern and Fossil Sediments: Collection of Scientific Articles]. Moscow, Nauka Publ., 1990, pp.140–145 (in Russian).
10. Simonenko E. P., Simonenko N. P., Zharkov M. A., Shembel N. L., Simonov-Emel'yanov I. D., Sevastyanov V. G., Kuznetsov N. T. Preparation of high-porous SiC ceramics from polymeric composites based on diatomite powder. *Journal of Materials Science*, 2015, vol. 50, no. 2, pp. 733–744. <https://doi.org/10.1007/s10853-014-8633-1>
11. Azarov S. M., Piatsiushyk E. E., Azarova T. A., Ratko A. I., Reut O. P., Makartshuk D. V. *Porous Aluminosilicate Ceramics*. Minsk, Kovcheg Publ., 2009. 258 p. (in Russian).

Информация об авторах

Азаров Сергей Михайлович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технологии и методики преподавания», Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: azarov@bntu.by

Балыдко Денис Николаевич – исследователь, заведующий сектором ОАО «АГАТ-СИСТЕМ» (ул. Ф. Скорины, 51Б, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: balydka.des@gmail.com

Information about the authors

Siarhei M. Azarau – D. Sc. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Technology and Teaching Methods, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Belarus). E-mail: azarov@bntu.by

Denis N. Balydka – Researcher, Head of the Sector, JSC “AGAT-SISTEM” (51B, F. Scorina Str., 220141, Minsk, Belarus). E-mail: balydka.des@gmail.com

МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА
MECHANICAL ENGINEERING, MECHANICS

УДК 621.787

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-310-316>

Поступила в редакцию 18.02.2020

Received 18.02.2020

В. В. Домасевич¹, Т. А. Ахметов¹, М. П. Кульгейко²

¹ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», Жлобин, Республика Беларусь

²Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Республика Беларусь

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ СИЛЫ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ИНСТРУМЕНТА И ДЕТАЛИ ПРИ ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКЕ
МЕТОДОМ АЛМАЗНОГО ВЫГЛАЖИВАНИЯ**

Аннотация. Рассмотрены основные факторы процесса алмазного выглаживания: сила контактного взаимодействия инструмента и детали в зоне деформации и трение на контактной поверхности детали и выглаживателя. Представлена методика аналитического определения оптимальной силы выглаживания для отделочно-упрочняющего режима обработки. Расчетным путем получены значения силы для некоторых характерных марок материалов небольшой и средней твердости (≤ 210 НВ, радиус индентора – 3,4 мм) и ряда закаленных сталей высокой твердости (радиус индентора – 2,0 мм). Также определены значения сил с использованием выражений для деформационной составляющей коэффициента трения. Сравнительный анализ результатов свидетельствует о достаточной для практических целей адекватности вариантов расчета. На конкретных примерах обрабатываемых материалов показаны графические зависимости, отражающие связь коэффициента трения, в том числе его деформационной составляющей, и силы выглаживания. С увеличением силы выглаживания увеличивается коэффициент трения, что объясняется увеличением глубины внедрения алмазного наконечника и, следовательно, ростом деформационной составляющей. Глубина внедрения индентора в обрабатываемую поверхность, а следовательно, коэффициент трения при выглаживании зависит от твердости обрабатываемого материала. С повышением твердости глубина внедрения уменьшается, что приводит к снижению деформационной составляющей и в целом коэффициента трения. На коэффициент трения также влияет радиус рабочей части инструмента, так как от его величины тоже зависит глубина внедрения индентора. Результаты исследований могут быть использованы при разработке технологии отделочно-упрочняющего алмазного выглаживания, освоении процесса и внедрении его в производство.

Ключевые слова: алмазное выглаживание, отделочно-упрочняющий режим, сила выглаживания, коэффициент трения

Для цитирования: Домасевич, В. В. Определение оптимальной силы контактного взаимодействия инструмента и детали при отделочно-упрочняющей обработке методом алмазного выглаживания / В. В. Домасевич, Т. А. Ахметов, М. П. Кульгейко // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2020. – Т. 65, № 3. – С. 310–316. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-310-316>

Vitaliy V. Domasevich¹, Timur A. Ahmetov¹, Mikhail P. Kulgeyko²

¹OJSC “BSW – Management Company of Holding “BMC”, Zhlobin, Belarus

²Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus

**DETERMINATION OF THE OPTIMAL STRENGTH OF CONTACT INTERACTION OF THE TOOL
AND THE PART DURING FINISHING-HARDENING TREATMENT BY DIAMOND SMOOTHING**

Abstract. The main factors of the process of diamond smoothing are considered in the work: the force of the contact interaction of the tool and the part in the deformation zone and the friction on the contact surface of the part and the smoother. The technique of analytical determination of the optimal smoothing force for the finishing-hardening treatment mode is presented. The calculated values were obtained for some characteristic grades of materials of small and medium hardness (≤ 210 HB, indenter radius 3.4 mm) and a number of hardened steels of high hardness (indenter radius 2.0 mm). The force

values are also determined using expressions for the deformation component of the friction coefficient. A comparative analysis of the results indicates that the calculation options are adequate for practical purposes. On specific examples of processed materials, graphical dependencies are shown, which reflect the relationship between the coefficient of friction, including its deformation component, and the smoothing force. With an increase in the leveling force, the friction coefficient increases, this is explained by an increase in the depth of penetration of the diamond tip and, consequently, an increase in the deformation component. The depth of penetration of the indenter into the surface to be treated, and therefore the coefficient of friction during ironing, depends on the hardness of the material being processed. With increasing hardness, the penetration depth decreases, which leads to a decrease in the deformation component and in general the coefficient of friction. The friction coefficient is also affected by the radius of the working part of the tool, since the indenter penetration depth also depends on its value. The research results can be used in the development of technology for finishing and hardening diamond smoothing, the development of the process and its introduction into production.

Keywords: diamond smoothing, finishing hardening mode, smoothing power, coefficient of friction

For citation: Domasevich V. V., Ahmetov T. A., Kulgeyko M. P. Determination of the optimal strength of contact interaction of the tool and the part during finishing-hardening treatment by diamond smoothing. *Vesti Natsyyanal'nai akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-technichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 3, pp. 310–316 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-310-316>

Введение. Процесс отделочно-упрочняющей обработки методом алмазного выглаживания является эффективным средством повышения эксплуатационных свойств деталей машин [1–5]. Алмазное выглаживание обеспечивает благоприятное сочетание параметров шероховатости, микрорельефа поверхности, микротвердости и значительной глубины упрочненного слоя при изготовлении деталей, работающих в условиях высоких скоростей и повышенного износа [5–8].

Алмазное выглаживание заключается в пластическом деформировании обрабатываемой поверхности скользящим по ней инструментом – выглаживателем с алмазным наконечником (рис. 1). Поверхностное пластическое деформирование методом алмазного выглаживания выполняют, как правило, инструментом со сферической рабочей частью после механической обработки точением или шлифованием. В результате на поверхности детали сглаживаются неровности предшествующей обработки и формируется новый поверхностный слой с другими геометрическими и физико-механическими характеристиками.

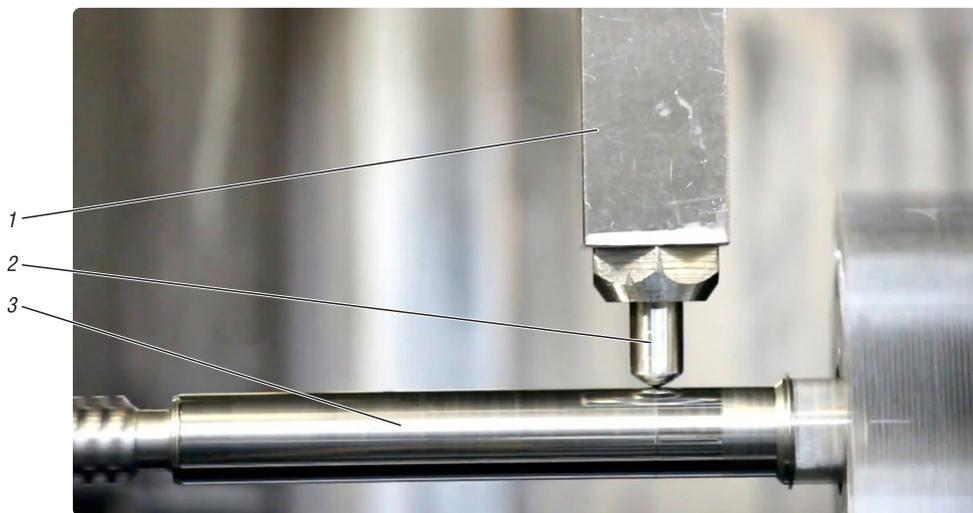


Рис. 1. Процесс алмазного выглаживания: 1 – державка, 2 – выглаживатель, 3 – обрабатываемая деталь

Fig. 1. Process of diamond smoothing: 1 – holder, 2 – smoother, 3 – workpiece

Условия контактного взаимодействия инструмента и обрабатываемой детали при алмазном выглаживании определяются многими факторами и параметрами, под влиянием которых формируются показатели качества поверхностного слоя детали. Основными значимыми факторами, наряду с технологическими параметрами, являются удельная сила контактного взаимодействия и трение на контактной поверхности выглаживателя и детали в зоне деформации [9, 10]. Удельная сила контактного взаимодействия определяется силой выглаживания, отнесенной к площади контакта выглаживателя с заготовкой, пропорциональна глубине вдавливания и определяет

толщину упрочненного слоя [11, 12]. Таким образом, сила выглаживания является одним из наиболее важных параметров процесса, позволяющим регулировать в широких пределах качество поверхности. Поэтому выбор оптимальной силы является актуальной задачей при реализации технологии отделочно-упрочняющего алмазного выглаживания.

Цель исследования – определение оптимальной силы выглаживания при отделочно-упрочняющем режиме обработки мягких материалов (≤ 210 НВ) и закаленных сталей и установление зависимости коэффициента трения и силы выглаживания.

Методика определения оптимальной силы выглаживания и коэффициента трения.

В процессе выглаживания сила P раскладывается на несколько составляющих: нормальную P_y , тангенциальную P_z и силу подачи P_x .

На основании приближенного решения задачи о скольжении жесткого радиусного выглаживателя по пластической поверхности зависимости P_x , P_y и P_z можно представить следующими уравнениями [13]:

$$P_x = C_x R^{0,5} h^{1,5} \sigma_T, \quad (1)$$

$$P_y = C_y R h \sigma_T, \quad (2)$$

$$P_z = C_z R^{0,5} h^{1,5} \sigma_T, \quad (3)$$

где C_x , C_y , C_z – коэффициенты, учитывающие конкретные условия обработки; R – радиус рабочей части выглаживателя, мм; h – глубина внедрения выглаживателя, мм; σ_T – предел текучести обрабатываемого материала, Па.

Основной является составляющая P_y , значение которой и принимаем за силу выглаживания.

Заменяв в формуле (2) абсолютную глубину внедрения выглаживателя h относительной глубиной внедрения $\varepsilon = h/R$, получаем

$$P = C \varepsilon \sigma_T R^2. \quad (4)$$

Так как величина предела текучести σ_T не всегда известна, воспользуемся величиной твердости по Виккерсу, позволяющей определить твердость как твердых, так и мягких материалов в единицах одной шкалы.

Для учета масштабного фактора, связанного с соотношением радиусов инструмента и обрабатываемой детали, заменим в формуле (4) радиус инструмента R приведенным радиусом [4]:

$$R = \frac{DR}{D + R}, \quad (5)$$

где D – диаметр обрабатываемой детали, мм.

После преобразований получаем следующее выражение:

$$P = C \varepsilon H V \left(\frac{DR}{D + R} \right)^2, \quad (6)$$

в котором C – коэффициент, $C = \pi$ [13].

Нормальное протекание процесса выглаживания происходит при определенных значениях относительной глубины внедрения ε инструмента в обрабатываемую поверхность. При относительной глубине внедрения, меньшей определенной величины ε_1 , инструмент с обрабатываемой поверхностью имеет упругую связь и выглаживания не происходит. При относительной глубине внедрения, большей определенной величины ε_2 , пластическое течение материала прекращается и начинается разрушение поверхностного слоя детали. Нормальное протекание процесса обеспечивается при $\varepsilon_2 > \varepsilon > \varepsilon_1$.

Для перехода от упругой деформации к пластической воспользуемся условием по данным И. В. Крагельского [14]:

$$\varepsilon_1 = \frac{h}{R} = 240 \frac{\sigma_T^2}{E^2}. \quad (7)$$

Расчеты показывают [13], что практические значения ε_1 , при которых начинается процесс выглаживания, равны 0,002–0,004 для закаленных сталей и 0,0002–0,0007 – для мягких материалов.

Эксперыменты паказалі, што адносную глыбіню внедрэння $\varepsilon_2 = 0,01\text{--}0,02$ можна лічыць прадельнай. Неабходная велічыня адноснай глыбіні внедрэння выбіраецца між мінімальнай і максімальнай на аснове рэкамендацый, прыведзеных далей. Расслічанная такім чынам сіла выглажвання P павінна забяспечыць атрыманне заданага якаства паверхнасці.

В працэсе выглажвання ў зоне кантакта інструмента з дэталлю ўзнікаюць сілы трэння, якія ўплываюць на працэс пратэкання пластычнай дэфармацыі, награв інструмента і дэталі, якасць абрабаванага паверхнасці. Трэне ўзнікае ўследствіе дэфарміравання тонкага паверхнага слоя матэрыяла абрабаванага дэталі внедрывшымся інструментам і прееадолення адгезійных сувязей, ўзнікаючых між інструментам і абрабаванага паверхнасцю. Устаановлена [15], што ў случае трэння ў ўмовах пластычнага кантакта каэффіцыент трэння можна адредзіць слеедуючым чынам:

$$f = f_{\text{деф}} + f_{\text{адг}}, \quad (8)$$

дзе $f_{\text{деф}}$ – дэфармацыйная склаааючая каэффіцыента трэння, $f_{\text{адг}}$ – адгезійная склаааючая каэффіцыента трэння (0,01–0,05).

Ізмененне каэффіцыента трэння пры рэзлічных рэжымах выглажвання прееадходзіць за счел дэфармацыйнай склаааючай, так как адгезійная склаааючая залежыць толькі ад абрабаванага матэрыяла і яго шеерохаватасці і не залежыць ад рэжымаў абрабавкі.

Дэфармацыйная склаааючая каэффіцыента трэння можа быць рэсслічана па фармуле [13]

$$f_{\text{деф}} = \frac{0,31}{R} \sqrt{\frac{P}{HV}} \quad (9)$$

ілі

$$f_{\text{деф}} = 0,55 \sqrt{\frac{h}{R}}. \quad (10)$$

Прыравняв правыя часты ураўненняў (9) і (10), пелучым

$$\frac{0,31}{R} \sqrt{\frac{P}{HV}} = 0,55 \sqrt{\frac{h}{R}}. \quad (12)$$

После некотрых прееобразаваній выраженне (12) можа запысать в вیده

$$\frac{0,1P}{RNV} = 0,3h, \quad (13)$$

откуда сіла выглажвання

$$P = 3hRNV. \quad (14)$$

Подставляя в фармулу (14) выраженне для h із залежымасці адноснай глыбіні внедренія $\varepsilon = h/R$, пелучым выраженне для адределенія сілы выглажвання:

$$P = 3\varepsilon HVR^2. \quad (15)$$

Реекамендуемые значенія адноснаго внедренія ε для адрделочно-упрочняючого рэжыма абрабавкі мягкых матэрыялаў і закаленых сталей равны 0,0025 і 0,005 соотвеественно.

Таким чынам, оптімальное значенне сілы выглажвання P для адрделочно-упрочняючого рэжыма можа адредзіць па слеедуючым фармулам:

для закаленых сталей і других матэрыялаў высокой твеедсці

$$P = 0,015HVR^2; \quad (16)$$

для матэрыялаў невысокы і среедней твеедсці

$$P = 0,0075HVR^2. \quad (17)$$

Пры оптімальных значеніях сілы выглажвання ісходные неровности полностью сглаживаются и образуется шеерохаватость, обусловленная самым працэсам выглажвання [16]. Далеейшее увеліченне сілы выглажвання увелічывае пластыческіе іскаженія, можа преевести к рэзрушенію паверхнага слоя і пееявленію треещин на абрабаванной паверхнасці.

Полученные результаты и их обсуждение. В качестве исходных данных были выбраны образцы $D = 50$ мм некоторых распространенных марок закаленных сталей и мягких материалов, радиус рабочей части алмазного наконечника 2,0 мм и 3,4 мм, соответственно. Исходная шероховатость $Ra = 0,63–1,25$ мкм для закаленных сталей и $Ra = 0,63–5,0$ мкм – для незакаленных сталей и цветных сплавов. В результате выполненных расчетов получены следующие значения силы выглаживания для некоторых марок материалов (табл. 1 и 2). В скобках представлены числовые значения, полученные с использованием выражения для деформационной составляющей коэффициента трения.

Т а б л и ц а 1. Расчетные значения оптимальной силы при отделочно-упрочняющем режиме обработки мягких сталей и сплавов (≤ 210 HB) при $\varepsilon = 0,0025$, $R = 3,4$ мм

Table 1. Calculated values of the optimal force with the finishing and hardening mode of handling of soft steels (≤ 210 HB) when $\varepsilon = 0.0025$, $R = 3.4$ mm

Марка материала	Вид термической обработки	HB, не более	Предел текучести σ_b , Н/мм ²	HRC	HV	P , Н
Сталь 45	Нормализация	197	275	–	197	157 (171)
Сталь 20X	Нормализация	167	215	–	167	133 (145)
Латунь литейная ЛЦ40С	–	70	–	–	70	56 (61)
Алюминиевый литейный сплав АК12	–	50	–	–	50	40 (43)

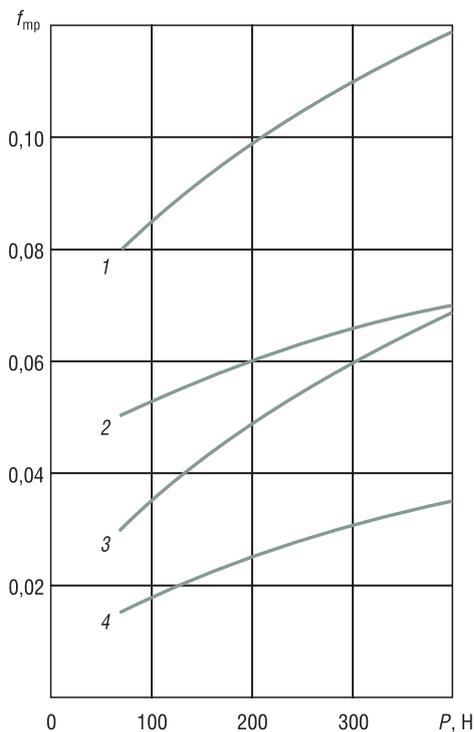


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения $f_{тр}$ (кривые 1 и 3, сталь 45, 197 HB, $R = 3,4$ мм) и его деформационной составляющей $f_{деф}$ (кривые 2 и 4, сталь 9XC, 63 HRC, $R = 2,0$ мм) от силы P

Fig. 2. Dependence of the coefficient of friction f_{tr} (curves 1 and 3, steel 45, 197 HB, $R = 3.4$ mm) and its deformation component f_{def} (curves 2 and 4, steel 9XC, 63 HRC, $R = 2.0$ mm) on the force P

Т а б л и ц а 2. Расчетные значения оптимальной силы при отделочно-упрочняющем режиме обработки закаленных сталей при $\varepsilon = 0,005$, $R = 2,0$ мм

Table 2. Calculated values of the optimum strength during the finishing-hardening treatment of hardened steels when $\varepsilon = 0.005$, $R = 2.0$ mm

Марка материала	Вид термической обработки	HB, не более	Предел текучести σ_b , Н/мм ²	HRC	HV	P , Н
Сталь ШХ15	Закалка, низкий отпуск	480	1030	–	501	291 (301)
Сталь 9XC	Закалка, низкий отпуск	–	–	63	763	443 (459)
Сталь ХВГ	Закалка, низкий отпуск	–	–	61	715	415 (429)
Сталь 110Г13Л	–	229	380	–	229	133 (137)

Расхождение расчетных значений двух вариантов определения силы выглаживания составляет до 4 % для закаленных сталей и до 9 % для мягких материалов. В целом результаты свидетельствуют об адекватности методик, а полученные значения следует рассматривать как ориентировочные при разработке технологии алмазного выглаживания. Окончательно режимы обработки уточняются экспериментально при внедрении процесса в производство.

На рис. 2 представлены графики зависимости коэффициента трения $f_{тр}$ и его деформационной составляющей $f_{деф}$ от силы P при алмазном выглаживании некоторых сталей. Значения деформационной составляющей

коэффициента трения $f_{\text{деф}}$ рассчитаны по формуле (9). Адгезионная составляющая принята $f_{\text{адг}} = 0,035$ – для закаленных сталей и $f_{\text{адг}} = 0,05$ – для нормализованных сталей [13]. При увеличении силы выглаживания коэффициент трения и его деформационная составляющая растут, а адгезионная составляющая остается примерно постоянной. Аналогичный вид имеет зависимость коэффициента трения от глубины внедрения выглаживателя. Коэффициент трения зависит также от твердости обрабатываемого материала. Установлено, что с увеличением твердости коэффициент трения уменьшается, что объясняется уменьшением его деформационной составляющей [см. (10)].

Заключение. Представленная методика определения силы взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью позволяет установить оптимальное значение силы выглаживания для отделочно-упрочняющего режима обработки. В качестве примера приведены результаты расчета силы выглаживания для некоторых марок мягких материалов (радиус наконечника $R = 3,4$ мм) и закаленных сталей ($R = 2,0$ мм), в том числе через деформационную составляющую коэффициента трения. Отмечается достаточная для практических целей сходимость результатов по двум вариантам расчета. С увеличением силы выглаживания увеличивается коэффициент трения за счет роста его деформационной составляющей, что иллюстрируется соответствующими графическими зависимостями. Результаты исследования могут быть использованы при разработке технологии и внедрении процесса алмазного выглаживания в производство.

Список использованных источников

1. Смелянский, В.М. Механика упрочнения деталей поверхностно-пластическим деформированием / В.М. Смелянский. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.
2. Бобровский, Н.М. Разработка научных основ процесса обработки деталей поверхностно-пластическим деформированием без применения смазочно-охлаждающих жидкостей / Н.М. Бобровский. – Тольятти: Тольяттин. гос. ун-т, 2008. – 170 с.
3. Губанов, В.Ф. Выглаживание: качество, технологии, инструменты / В.Ф. Губанов. – М.: Изд. дом Акад. естествознания, 2013. – 70 с.
4. Одинцов, Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностно-пластическим деформированием: справочник / Л.Г. Одинцов. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.
5. Чепя, П.А. Эксплуатационные свойства упрочненных деталей / П.А. Чепя, В.А. Андриянин; под ред. О.В. Берестнева. – Минск: Наука и техника, 1988. – 192 с.
6. Гуров, Р.В. Методология проектирования операций отделочно-упрочняющей обработки деталей машин поверхностно-пластическим деформированием / Р.В. Гуров // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. – 2010. – №4 (28). – С. 17–23.
7. Блюменштейн, В.Ю. Исследование остаточных напряжений поверхностного слоя в процессах поверхностно-го пластического деформирования / В.Ю. Блюменштейн, М.С. Махалов // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2015. – №3. – С. 41–48.
8. Мельников, П.А. Оптимизация параметров процесса выглаживания в производственных условиях с целью получения поверхности, пригодной для работы в условиях гидродинамического трения / П.А. Мельников, Н.М. Бобровский // Вектор науки ТГУ. – 2011. – №2 (16). – С. 65–67.
9. Титов, В.А. Повышение ресурса изделий из титановых сплавов методом алмазного выглаживания / В.А. Титов, А.В. Титов // Кузнечно-штамповочное производство. – 2010. – №4. – С. 18–24.
10. Рязанова-Хитровская, Н.В. Некоторые пути повышения эффективности процесса алмазного выглаживания / Н.В. Рязанова-Хитровская, И.Н. Пыжов, Н.В. Крюкова // Високі технології в машинобудуванні. – 2015. – Вип. 1 (25). – С. 173–182.
11. Чепя, П.А. Технологические основы упрочнения деталей поверхностно-пластическим деформированием / П.А. Чепя. – Минск: Наука и техника, 1981. – 128 с.
12. Особенности формирования глубины упрочнения при обработке деталей поверхностно-пластическим деформированием / Я.Н. Отений [и др.] // Междунар. журн. приклад. и фундамент. исслед. Техн. науки. – 2016. – №12. – С. 452–455.
13. Торбило, В.М. Алмазное выглаживание / В.М. Торбило. – М.: Машиностроение, 1972. – 105 с.
14. Крагельский, И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
15. Михин, Н.М. Трение в условиях пластического контакта / Н.М. Михин. – М.: Наука, 1968. – 104 с.
16. Технологические особенности формирования параметров качества поверхностного слоя при алмазном выглаживании в условиях интегрированной обработки / В.Ю. Скиба [и др.] // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2015. – №3 (68). – С. 31–41.

References

1. Smelyanskii V. M. *Mechanics Hardening the Details of the Surface-Plastic Deformation*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2002. 300 p. (in Russian).
2. Bobrovskii N. M. *Development of the Scientific Basis for the Processing of Parts by Surface-Plastic Deformation without the use of Lubricant-Coolants*. Togliatti, Togliatti State University, 2008. 170 p. (in Russian).
3. Gubanov V. F. *Smoothing: Quality, Technologies, Tools*. Moscow, Publ. House of the Academy of Natural Sciences, 2013. 70 p. (in Russian).
4. Odincov L. G. *Hardening and Finishing of Parts by Surface Plastic Deformation*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 328 p. (in Russian).
5. Chepa P. A., Andriyanin V. A. Berestnev O. V., ed. *Performance Properties of Hardened Parts*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1988. 192 p. (in Russian).
6. Gurov R. V. Methodology of designing operations for finishing and hardening processing of machine parts by surface-plastic deformation. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Brest State Technical University], 2010, no. 4 (28), pp. 17–23 (in Russian).
7. Blumenstein V. Y., Makhhalov M. S. Investigation of residual stresses of the surface layer in the processes of surface plastic deformation. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2015, no. 3, pp. 41–48 (in Russian).
8. Mel'nikov P. A., Bobrovskii N. M. Optimization parameters of the smoothing process in production conditions in order to obtain a surface suitable for work in conditions of hydrodynamic friction. *Vektor nauki TGU* [Science Vector Togliatti State University], 2011, no. 2 (16), pp. 65–67 (in Russian).
9. Titov V. A., Titov A. V. Increasing the life of titanium alloy products by diamond smoothing. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo* [Forging and Stamping Production], 2010, no. 4, pp. 18–24 (in Russian).
10. Ryazanova-Khitrovskaya N. V., Pyzhov I. N., Kryukova N. V. Some ways to improve the efficiency of the diamond smoothing process. *Visoki tekhnologii v mashinobuduvanni* [High-Technologies in Mechanical Engineering], 2015, issue 1 (25), pp. 173–182 (in Russian).
11. Chepa P. A. *Performance properties of hardened parts*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1988. 192 p. (in Russian).
12. Otenii Y. N., Privalov N. I., Shchegolev N. G., Murav'ev O. P., Tkacheva Yu. O. Features of forming the depth of hardening when processing parts by surface-plastic deformation. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy. Tekhnicheskie nauki* [International Journal of Applied and Fundamental Research. Technical Science], 2016, no. 12, pp. 452–455 (in Russian).
13. Torbilo V. M. *Diamond Smoothing*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 105 p. (in Russian).
14. Kragielskii I. V. *Friction and Wear*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968. 480 p. (in Russian).
15. Mihin N. M. *Plastic Contact Friction*. Moscow, Nauka Publ., 1968. 104 p. (in Russian).
16. Skiba Y. V., Pushnin V. N., Kornev D. Yu., Parts K. A. Technological features of the formation of surface layer quality parameters for diamond smoothing under integrated processing conditions. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* [Metal Processing (Technology, Equipment, Tools)], 2015, no. 3 (68), pp. 31–41 (in Russian).

Информация об авторах

Домасевич Виталий Вячеславович – аспирант, Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого (пр. Октября, 48, 246746, Гомель, Республика Беларусь); инженер-конструктор бюро сталеплавильного производства управления проектирования и реконструкции, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» (ул. Промышленная, 37, 247210, Жлобин, Гомельская обл., Республика Беларусь). E-mail: domasevich-v@yandex.ru

Ахметов Тимур Альфритович – начальник метизной лаборатории исследовательского центра, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» (ул. Промышленная, 37, 247210, Жлобин, Гомельская обл., Республика Беларусь). E-mail: metiz.to@bmz.gomel.by

Кульгейко Михаил Петрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Графика», Белорусский государственный университет транспорта (ул. Кирова, 34, 246653, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: kulgeyko82@rambler.ru

Information about the authors

Vitaliy V. Domasevich – Graduate Student, P.O. Sukhoi State Technical University of Gomel (48, Octiabria Ave., 246746, Gomel, Republic of Belarus); Design Engineer Bureau of Steel Production, Management of Design and Reconstruction, OJSC “BSW – Management Company of Holding “BMC” (37, Promyshlenaya Str., 247210, Zhlobin, Gomel Region, Republic of Belarus). E-mail: domasevich-v@yandex.ru

Timur A. Ahmetov – Head of the Hardware Laboratory of the Research Center, OJSC “BSW – Management Company of Holding “BMC” (37, Promyshlenaya Str. 247210, Zhlobin, Gomel Region, Republic of Belarus). E-mail: metiz.to@bmz.gomel.by

Mikhail P. Kulgeyko – Ph. D. (Engineering), Associate Professor of the Department “Graphics”, Belarusian State University of Transport (34, Kirov Str., 246746, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: kulgeyko82@rambler.ru

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

УДК 620.9:697.273
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-317-331>

Поступила в редакцию 04.04.2020
Received 04.04.2020

А. П. Ахрамович¹, И. В. Войтов², В. П. Колос¹

¹*Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

²*Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь*

**ИНТЕГРАЦИЯ АЭС В ЭКОНОМИКУ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ.
ИНФРАКРАСНАЯ СИСТЕМА АСЛОТУ**

Аннотация. Составлен статистический массив из трех сопоставляемых величин: численности населения и удельных (из расчета на душу населения за год) валовой добавленной стоимости (УВДС) и потребления электроэнергии (УПЭ) для 50 стран с УВДС, большим или сравнимым с белорусским. Методами корреляционного анализа установлено наличие сильной положительной достоверной связи между УВДС и УПЭ. Получено, что для инновационного развития экономики Беларуси и ускоренного роста УВДС необходимо увеличить установленные электрические мощности на 20–25 %. Отмечено, что ядерная энергетика является основным ресурсом пятого технологического уклада. Решаемые при эксплуатации АЭС задачи содействуют разработке новой техники, зарождению и внедрению передовых способов производства в различных отраслях экономики. Требуемый современными технологиями микроклимат в рабочих зонах предприятий и на рабочих местах учреждений предложено обеспечивать автоматизированной системой лучистого обеспечения технологических условий – АСЛОТУ, созданной белорусскими специалистами. Приведены структура данной инфракрасной установки, принципы ее расчета и особенности алгоритма функционирования. Определены технико-экономические показатели АСЛОТУ – стоимость, продолжительность службы, трудоемкость и частота обслуживания, затраты на потребляемое топливо, срок окупаемости вложенных средств на внедрение. Отмеченные показатели получены в результате обработки данных по эксплуатации АСЛОТУ, установленных в Беларуси за период с 1997 по 2007 г. Они легли в основу проекта плана внедрения АСЛОТУ до 2035 г. Полученные результаты могут быть использованы в других странах с УВДС 4,0–15,0 тыс. долл./чел. за год, которые взяли курс на инновационное развитие экономики.

Ключевые слова: электричество, технологический уклад, добавленная стоимость, генерирующие мощности, корреляционный анализ, микроклимат в помещении, инфракрасная система, срок окупаемости, план внедрения

Для цитирования: Ахрамович, А. П. Интеграция АЭС в экономику Республики Беларусь. Инфракрасная система АСЛОТУ / А. П. Ахрамович, И. В. Войтов, В. П. Колос // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, № 3. – С. 317–331. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-317-331>

Aliaksandr P. Akhramovich¹, Igor V. Voitov², Valery P. Kolos²

¹*Institute of Power Engineering of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

²*Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus*

**NUCLEAR POWER STATION INTEGRATION IN THE ECONOMY OF REPUBLIC OF BELARUS.
INFRARED SYSTEM ASLOTU**

Abstract. Statistical series of economic and energy indicators had been made up according to 2017 data. It consisted of three comparable values: population and specific (capita per inhabitant in the year) gross value added (SGVA) and electricity consumption (SEC) for fifty countries, which SGVA are larger or comparable to Belarus values. Using the correlation analysis the presence of strong, positive, reliable relationship between SGVA and SEC was established. It was found, that for the innovative development of Belarusian economy and accelerated growth of SGVA, the installed electric capacities are necessary to increase by 20–25 %. It is pointed that nuclear energy is the main resource of the fifth technological setup. The solving tasks during atomic

stations operation promote development of new technology, emergence and insure advanced production methods in various economy sections. It is offered to create microclimate, required by modern technologies, in working zones of plants and at workplaces in institutions by an automated system ASLOTU – the radiant system of insuring technological conditions, which had been created by Belarusian specialists. The structure of this infrared system, principles of its calculation and specific functioning algorithm are given. The ASLOTU technical and economic indicators have been determined – cost, service life, labor intensity and frequency of maintenance, costs of fuel consumed, period of covering capital outlays. The marked indicators are the result of processing the operation data of ASLOTU, which were implemented in Belarus for the period 1997 to 2007. They formed the basis of the draft ASLOTU introduction plan until 2035. The main planned indicators are given. The results can be used in other countries in which SGVA is 4.0–15.0 thousand dollars per person and they took course toward innovative development of the economy.

Key words: electricity, technological setup, gross value added, generating capacity, correlation analysis, indoor climate, infrared system, payback period, introduction plan

For citation: Akhramovich A. P., Voitov I. V., Kolos V. P. Integration of nuclear power station in the economy of Republic of Belarus. Infrared system ASLOTU. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 3, pp. 317–331 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-317-331>

Введение. Роль электричества. Электрическая энергия – энергия направленного движения заряженных частиц (в подавляющем большинстве случаев электронов) – обладает уникальными свойствами. Она чрезвычайно быстро и с относительно низкими затратами передается на большие расстояния, легко делится на части в любых пропорциях, просто и с малыми потерями преобразуется в другие виды энергии, гигиенична, экологична, не сложна в управлении (регулировании), элементарно контролируется и учитывается. Никакая другая совокупность способов и устройств не в состоянии обеспечить той экономичности, безопасности и надежности производственных процессов и комфортности бытовых условий, которые дают электротехнологии.

Со второй половины XIX в. электричество как прогрессивный вид энергии прочно укореняется на производстве и в быденной жизни. Уже в третьем технологическом укладе (1880–1930 гг.) электроэнергия играет роль основного ресурса [1–3]. Ее использование привело к развитию тяжелого машиностроения, образованию электротехнической промышленности, автомобильной отрасли, изобретению и внедрению телеграфа, телефона, радио. Странами – лидерами третьего уклада стали США, Великобритания, Франция, Германия [4, 5].

Доминирование электроэнергии просматривается и в последующих четвертом и пятом технологических укладах. Благодаря ей конвейерные технологии, автоматические линии со станками с программным управлением становятся основой для массового производства автомобилей, тракторов, самолетов, различных видов вооружения, товаров народного потребления и т. д. С 1970 г. в производственном секторе высокоразвитых стран активно набирают вес технологии на базе телекоммуникаций, роботостроения, микроэлектроники, вычислительной, оптико-волоконной и беспроводной техники. Зарождаются малозатратные аддитивные технологии и цифровая экономика [6–9].

Заложенное еще в 1920-е годы планом ГОЭРЛО приоритетное развитие электроэнергетики и рост в последующие десятилетия в Советском Союзе генерирующих мощностей позволили ему наравне с США и западноевропейскими странами стать лидером четвертого технологического уклада [5]. Однако увлечение современной России сырьевой экономикой (эпоха нефти закончилась в 1970-е годы) не позволило ей сохранить передовые позиции в пятом укладе [5, 10].

В настоящее время прорисовываются контуры уже шестого технологического уклада. Бесспорно, его станут определять экологически чистые производства, нано- и клеточные технологии, геновая инженерия, глобальные информационные сети. В рамках этого уклада с большой долей вероятности будут созданы квантовый компьютер и искусственный интеллект, на принципиально новый уровень поднимется управление экономикой. Замены же электричества на другой, более приемлемый вид энергии как в шестом, так и в последующих за ним укладах специалистами не предвидится.

В промышленном секторе высокоразвитых стран доля четвертого технологического уклада составляет примерно 20 %, пятого – 60 %, шестого – 5 % [11]. В то же время в постсоветских странах при потреблении электроэнергии на душу населения в 2,7 раза меньше, чем в развитых государствах [12], наблюдается следующее распределение: третий уклад – 30 %, четвертый – 50 %, пятый – 10 % [11]. В европейских близлежащих к нам странах с уже хорошо сформировавшейся цифровой экономикой потребление электроэнергии на душу населения намного превышает белорусское: в Швеции в 3,8 раза, Финляндии – в 4,3, Норвегии – в 6,5 раза [12].

О величине генерируемых мощностей. Из приведенных данных следует, что низкий уровень потребления электроэнергии в Беларуси не столько результат запаздывания в развитии технологий, сколько источник этого отставания. Проведем корреляционный анализ и определим численные значения характеристик отмеченной причинно-следственной связи. В качестве показателя уровня экономического развития государства примем удельную валовую добавленную стоимость (УВДС) – валовую добавленную стоимость за год, приходящуюся на душу населения страны. Составим массив из трех величин: УВДС, численность населения и УПЭ (удельное потребление электроэнергии, то есть потребление за год из расчета на одну душу населения страны) по статистическим данным за 2017 год 50 государств – 34 европейских с числом населения, превышающим 1 млн человек, и 16 с других континентов с УВДС бóльшим или сравнимым с УВДС Беларуси [12, 13]. Страны с их показателями в массиве расположим в соответствии с рейтингом, определяемым значением УВДС, затем в порядке сложившейся нумерации разобьем на пять групп – **A, B, C, D, E**, по 10 стран в каждой. Построенный таким образом массив из трех статистических рядов $X(x_i), Y(y_i), Z(z_i)$ приведен в табл. 1.

Для каждой группы стран по формулам

$$\bar{a}_i = \frac{1}{N} \sum_i a_i; \quad \langle a_i \rangle = \frac{\sum_i a_i z_i}{\sum_i z_i}; \quad a_i = x_i, y_i, N = 10 \quad (1)$$

были определены среднее арифметическое и среднее относительно числа населения значения следующих выборок $X, Y: i = 1; 10; i = 11; 20; \dots; i = 41; 50$; результаты расчета приведены в двух крайних правых столбцах табл. 1.

Используя данные по всем 50 странам, методом Пирсона найдем коэффициенты корреляции между полными статистическими рядами X, Z и $Y, Z (i = 1; 50)$. Их значения $r_{xz} = -0,07; r_{yz} = -0,036$ близки к нулю и по абсолютной величине не превосходят средних ошибок $m_{xz} \approx m_{yz} \approx 0,14$. Для решения вопроса о достоверности характера корреляционной связи было сформировано два множества пар рядов по 20, 30 и 40 произвольно выбранных согласованных по i элементов соответственно для первого множества из XZ , для второго – из YZ . Расчеты показывают, что корреляционные коэффициенты для рядов из первого и второго множества практически в равной мере имеют как положительные, так и отрицательные значения и находятся в интервале $(-0,22; +0,22)$. Из этого следует, что силы корреляционной связи между X и Z , а также между Y и Z малы, и цифры в двух последних столбцах табл. 1 характеризуют вероятностную зависимость удельной валовой добавленной стоимости от удельного потребления электроэнергии.

Отношение \bar{x}_i / \bar{y}_i является квалификационным показателем эффективности экономики групп государств, научно-технического и технологического уровня их развития. Для государств групп **A** и **B**, примерно 55 % добавленной стоимости которых обеспечиваются технологиями пятого уклада и 4 % шестого, при среднем по странам УПЭ соответственно 10,8 и 8,4 МВт·ч/чел. отношения \bar{x}_i / \bar{y}_i равны 5,0 и 4,4 тыс. долл./МВт·ч за год. Для групп **C** и **D** (доля шестого технологического уклада 2 % и пятого 30 %, УПЭ составляет 6,7 и 4,1 МВт·ч/чел.) показатели эффективности имеют значения 2,9 и 2,7 тыс. долл./МВт·ч. Для стран группы **E**, в которую входит Беларусь (пятый уклад не превышает 10 %, четвертый – 45 %, УПЭ – 3,6 МВт·ч/чел.), этот показатель приблизительно равен 1,4 тыс. долл./МВт·ч.

Определим необходимые условия перехода из группы **E** в соседнее с ней объединение **CUD**. Для этого из X и Y составим статистические ряды для **E** ($i = 41; 50$) и **CUD** ($i = 21; 40$) и определим значения основных корреляционных показателей (табл. 2). Значения величин, обозначенных литерой с волной, рассчитаны путем замены в соотношениях Пирсона $\bar{x}_i; \bar{y}_i$ на $\langle x_i \rangle; \langle y_i \rangle$.

Приведенные в табл. 2 данные свидетельствуют о наличии сильной положительной достоверной связи между УВДС и УПЭ. Таким образом, получаем, что для достижения экономикой Беларуси УВДС, характерной странам групп **CUD**, необходимо поэтапно нарастить электропотребление примерно на 40 %; вначале на 12–14 %, введя дополнительно к уже существующим 10 000 МВт установленных мощностей еще 2000–3000 МВт. Это позволит модернизировать производственный сектор экономики, увеличив в нем долю технологий пятого уклада в 2 раза, войти и закрепиться в группе **D**, достигнув УВДС 9–11 тыс. долл./чел.

Т а б л и ц а 1

T a b l e 1

Группа	№ п/п	Страна	УВДС тыс. долл./чел., X	УПЭ, МВт·ч/чел., Y	Численность населения, млн чел., Z	$\bar{x}_i; < x_i >$, тыс. долл./чел.	$\bar{y}_i; < y_i >$, МВт·ч/чел.
A	1	Швейцария	77,39	7,54	8,5	53,93; 57,07	10,83; 12,16
	2	Норвегия	66,60	23,58	5,3		
	3	Ирландия	65,25	5,83	4,8		
	4	США	59,88	12,57	326,0		
	5	Австралия	53,68	9,92	24,6		
	6	Швеция	47,45	13,53	10,1		
	7	Нидерланды	43,71	6,75	17,1		
	8	Австрия	42,41	8,47	8,8		
	9	Канада	42,18	14,29	36,5		
	10	Дания	40,72	5,84	5,8		
B	11	ОАЭ	40,18	13,05	9,4	37,34; 36,44	8,43; 7,06
	12	Финляндия	40,09	15,49	5,5		
	13	Германия	39,92	6,94	82,7		
	14	Бельгия	39,81	7,87	11,3		
	15	Новая Зеландия	39,13	8,60	4,8		
	16	Япония	38,15	8,11	126,7		
	17	Израиль	36,64	6,85	8,7		
	18	Великобритания	36,02	4,95	66,0		
	19	Франция	34,41	7,20	67,1		
	20	Италия	29,09	5,20	60,5		
C	21	Южная Корея	28,90	10,66	51,4	19,07; 23,61	6,70; 7,86
	22	Испания	25,59	5,54	46,5		
	23	Саудовская Аравия	20,92	9,59	32,9		
	24	Словения	20,10	7,10	2,1		
	25	Португалия	18,60	5,01	10,3		
	26	Эстония	17,92	7,23	1,3		
	27	Чехия	17,33	6,57	10,6		
	28	Греция	16,48	5,59	10,8		
	29	Словакия	15,85	5,46	5,4		
	30	Литва	15,32	4,29	51,4		
D	31	Латвия	13,89	3,68	1,9	11,28; 9,13	4,09; 4,60
	32	Чили	13,72	4,06	18,5		
	33	Аргентина	12,23	3,00	44,3		
	34	Венгрия	12,22	4,32	9,8		
	35	Польша	11,77	4,24	38,4		
	36	Хорватия	11,15	4,20	4,1		
	37	Россия	9,86	6,77	144,5		
	38	Румыния	9,78	2,78	19,6		
	39	Турция	9,41	3,26	80,3		
	40	Китай	8,76	4,55	1 386,4		
E	41	Казахстан	8,72	5,13	18,0	4,91; 4,80	3,62; 3,80
	42	Болгария	7,17	5,17	7,1		
	43	Южная Африка	5,52	4,01	56,7		
	44	Сербия	5,23	4,73	7,0		
	45	Беларусь	5,00	3,60	9,5		
	46	Македония	4,71	3,14	2,1		
	47	Босния и Герцеговина	4,40	3,80	3,5		
	48	Албания	3,93	2,14	2,9		
	49	Молдова	2,33	1,53	3,6		
	50	Украина	2,11	2,99	44,8		

Т а б л и ц а 2

Table 2

Группа	$\bar{x}_i; <x_i>$, тыс. долл./чел.	$\bar{y}_i; <y_i>$, МВт·ч/чел.	$r_{xy}; \tilde{r}_{xy}$	$m_{xy}; \tilde{m}_{xy}$	$r_{xy} / m_{xy}; \tilde{r}_{xy} / \tilde{m}_{xy}$
Е	4,91; 4,80	3,62; 3,80	0,845; 0,826	0,095; 0,106	8,89; 7,78
СUD	15,49; 10,44	5,40; 4,89	0,746; 0,686	0,102; 0,12	7,32; 5,72
Группа	$\frac{\bar{x}_i - <x_i>}{\bar{x}_i}$	$\frac{\bar{y}_i - <y_i>}{\bar{y}_i}$	$\frac{r_{xy} - \tilde{r}_{xy}}{r_{xy}}$	$\frac{m_{xy} - \tilde{m}_{xy}}{m_{xy}}$	$\frac{r_{xy} / m_{xy} - \tilde{r}_{xy} / \tilde{m}_{xy}}{r_{xy} / m_{xy}}$
Е	0,023	-0,047	0,02	-0,116	0,125
СUD	0,326	0,093	0,08	-0,176	0,219

Ядерная энергетика является основным ресурсом пятого технологического уклада [1, 3]. Эксплуатация Белорусской АЭС (БелАЭС) даст не только необходимую для развития страны электрическую энергию высокого качества, но и приведет к позитивным изменениям во всех сферах деятельности, прежде всего в науке, технике и образовании. Перед обществом будут поставлены новые сложные задачи, решение которых поднимет интеллектуальный уровень населения, что положительно отразится на экономике и безопасности (обороноспособности) страны.

Энергоблок с реактором ВВЭР-1200 поколения 3+ БелАЭС является эволюционным продуктом. Данный реактор разработан на базе ВВЭР-1000; в нем улучшен практически каждый параметр. Это позволило повысить на 20 % мощность станции и увеличить срок службы энергоблока до 60 лет. Разработаны и внедрены также оригинальные дополнительные системы безопасности, позволяющие снизить вероятность выхода из контеймента радиоактивных продуктов деления при авариях. И главное, ВВЭР-1200 допускает модернизацию.

Российские специалисты при финансовой поддержке французско-немецкой фирмы Framatome для данного типа реактора разработали тепловыделяющую сборку с микротвэлами [14, 15]. Внедрение ее на действующих АЭС предполагается осуществлять простой заменой стержневыхборок, при этом корпус реактора и другие основные системы и агрегаты станции в реконструкции не нуждаются. Есть основания предположить, что в обозримом будущем данная модернизация будет проведена и на БелАЭС. В результате существенно снизится стоимость топливного цикла, а безопасность эксплуатации станции повысится до уровня, исключающего выход радиоактивных продуктов деления в атмосферу при любых авариях (даже при разрушении корпуса реактора и защитной железобетонной оболочки), при любых отказах оборудования, ошибочных действиях обслуживающего персонала и террористических актах. Микротвэлы – антитеррористическое ядерное топливо [16, 17].

АСЛОТУ. Общие положения. Согласно рейтингу эффективности использования топливно-энергетических ресурсов, Беларусь находится далеко от стран-лидеров. Энергоемкость ее ВВП – отношение потребленных за год тонн условного топлива к стоимости по международному обменному курсу произведенного валового внутреннего продукта – в 1,5 раза больше осредненного по европейским странам значения [12]. Данный факт говорит о насущной необходимости модернизации производственного сектора и сферы услуг с масштабным привлечением малокапиталоемких технологий пятого и шестого укладов.

Прямое увеличение потребления электроэнергии в стране в результате пуска БелАЭС без повышения эффективности ее использования экономически нецелесообразно. В таком случае рациональное расходование электричества, вырабатываемого АЭС в Республике Беларусь, является проблемой не столько энергетики, сколько остальных отраслей экономики. Решать ее следует уже сейчас, рассматривая создающуюся ситуацию с ожидаемым профицитом электроэнергии как уникальную возможность технологического прорыва в производственной, социальной и бытовой сферах. Но никакое, даже ультрасовременное оборудование пятого-шестого укладов не обеспечит должной конкурентоспособности продукции, если в рабочих зонах не будет создан надлежащий микроклимат.

В соответствии с материалами, положенными в основу международного стандарта ISO 7730, отклонение температуры в рабочей зоне (рис. 1) от оптимальной всего лишь на 1 °С приводит к снижению производительности труда на 3,6 %, а если отклонение составит 2–3 °С, то об успешном продвижении товаров на рынке и росте УВДС следует забыть. Аналогичная картина имеет место и для воздухообмена.

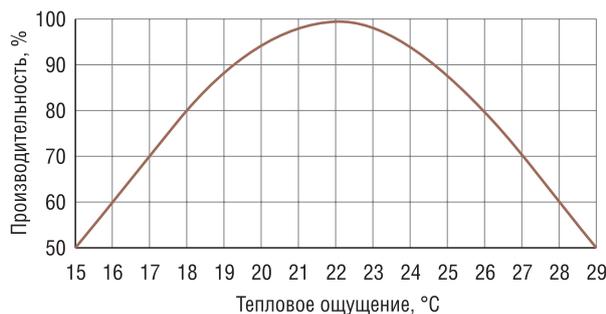


Рис. 1. Зависимость производительности труда от теплового ощущения

Fig. 1. Dependence of labor productivity on heat sensation

Обеспечение требуемых параметров микроклимата при минимально возможных затратах топливно-энергетических ресурсов возможно только с помощью отопительно-вентиляционных систем, снабженных интеллектуальными устройствами регулирования. Из них двухфункциональными, гибкими в управлении и потому наиболее эффективными оказались системы с электрическими инфракрасными (ИК) излучателями, разработанные специалистами НАН Беларуси при поддержке Департамента по энергоэффективности и Государственного комитета по науке и технологиям Республики Беларусь по заданию № 20 Государственной научно-технической программы «Энергосбережение». Эти устройства, состоящие из трех частей – батарей ИК-излучателей, сети электроснабжения с вводно-распределительным устройством и коммутационно-защитной аппаратурой, блоков управления с датчиками обратной связи, получили название АСЛОТУ (автоматизированная система лучистого обеспечения технологических условий).

Принцип работы АСЛОТУ состоит в преобразовании электрической энергии в энергию поперечных электромагнитных волн ИК-диапазона, одна часть которой при взаимодействии с предметами затрачивается на интенсификацию массообменных, химических, биохимических процессов, другая преобразуется в тепло, расходуемое на обогрев помещений. Этим объясняется двухфункциональность системы. АСЛОТУ не может существовать отдельно от строительного объекта, для которого она разработана, и поэтому классифицируется как изделие единичного производства, изготавливаемое по месту эксплуатации.

Методика расчета АСЛОТУ сводится к поиску параметров излучателей, характеристик установки их в помещении и элементов матрицы распределения электрической мощности, обеспечивающих требуемый строительными, санитарными и производственными нормами микроклимат в рабочей зоне при минимуме затрат:

$$J^0 = J + (\Psi_W + \Psi_S + \Psi_D)\tau^* = \min, \quad (2)$$

где J^0 – затраты на эксплуатацию АСЛОТУ за год; J – расход денежных средств на оплату энергии, потребленной АСЛОТУ и вентиляцией за год; Ψ_W , Ψ_S , Ψ_D – соответственно, затраты, обусловленные износом оборудования, расходы на оплату труда обслуживающего персонала и потери поступлений по банковскому депозиту за три года (примерный срок окупаемости АСЛОТУ) с момента ввода системы в эксплуатацию, отнесенные к продолжительности этого периода; τ^* – продолжительность работы АСЛОТУ в течение года [18].

В основу указанной методики положены результаты исследований теплопереноса в крупноячеистых гетерогенных системах, распространения электромагнитных волн в поглощающих средах, вихреобразования на шероховатых поверхностях, биологического воздействия инфракрасного излучения [19–22].

Эти данные позволили модернизировать и конструкцию ИК-излучателя, главным элементом которого является пакет излучающих (эманационных) пластин [23]. Сама пластина делается двуслойной; подложка изготавливается из алюминия, на нее наносится шероховатость в виде строго ориентированных треугольных канавок и затем покрывается слоем оксида. За счет различия в излучательных свойствах металлов и диэлектриков [24, 25] и особенностей вихревых пристеночных течений [21], приводящих к зарождению вихревой пелены вблизи поверхностей пластин, удалось значительно улучшить показатели излучателя. Ввод дополнительно к обычным (устоявшимся на практике) аргументам индикатрисы, влияющим на ее характер, двух новых – величины двугранного угла раскрытия канавок и толщины оксидного покрытия, позволили получить пространственное распределение в помещении энергии излучения АСЛОТУ, наиболее приемлемое для полифункционального действия. Вихревая же пелена является своеобразным теплоизолятором.

При умеренных температурах пластин (200–400 °С) она снижает интенсивность конвективного теплосъема с них, не усиливая при этом поглощение и рассеивание ИК-излучения.

В АСЛОТУ используется цифровое управление параметрами микроклимата. Алгоритм управления построен на основании нечеткой логики, содержит операции с псевдослучайными числами и кусочно-непрерывными функциями. Заложенные совокупность и последовательность действий позволяют минимизировать время перехода с одних значений параметров микроклимата на другие (например, при смене дежурного режима основным) и, соответственно, расход электрической энергии, потребляемой АСЛОТУ за этот период, а также исключить генерацию помех и загрязнение ими электрических сетей, удерживать спектр ИК-излучения близким к номинальному при работе АСЛОТУ на частичных нагрузках.

Технико-экономические показатели АСЛОТУ. В период с 1997 по 2007 г. АСЛОТУ была внедрена более чем на 30 объектах народного хозяйства – ею оснащены свыше 1000 помещений различного целевого назначения. Помимо этого, были выполнены десятки проектов АСЛОТУ, которые прошли экспертизу в РУП «Главгосстройэкспертиза», разработаны детальные технико-экономические обоснования для ведущих предприятий промышленности и сельского хозяйства, учреждений, здравоохранения и образования. Обобщение данных, полученных в результате этих работ, позволили определить стоимость и срок окупаемости АСЛОТУ, экономию топливно-энергетических ресурсов в результате перехода от традиционных систем отопления к лучистым для различных отраслей экономики.

Удельная стоимость АСЛОТУ (в расчете на 1 м²) цехов промышленных предприятий нелинейно зависит от F – суммарной площади рабочих зон, в которых она обеспечивает требуемый микроклимат; значения ее приведены на графике (рис. 2). Для учреждений здравоохранения стоимость данной системы составляет 90–100 долл./м², для учреждений образования и социального обслуживания – 65–75 долл./м², объектов транспорта и коммуникаций – 58–62 долл./м², цехов и ферм сельскохозяйственных предприятий 65–70 долл./м².

Анализ процесса образования стоимости АСЛОТУ позволяет сделать вывод, что при массовом производстве данных систем их цена снизится в 1,5–2 раза.

На практике переход от традиционных (воздушных или водяных) систем отопления к АСЛОТУ приводил к заметному снижению расхода топливно-энергетических ресурсов в результате разбиения помещений на участки и поддержания индивидуальных параметров микроклимата на них, концентрации лучистого потока на технологическом оборудовании, более полной автоматизации обогрева, сокращения теплотрасс с их большими потерями тепла, уменьшения кратности воздухообмена. Это обусловлено снижением градиента температуры воздуха по высоте помещения, уменьшением инфильтрации через ограждающие конструкции, сравнительно небольшой тепловой инерционностью ИК-излучателей, гистерезисом в процессе прогрева и остывания здания при переходе с дежурного режима на основной и обратно. При работе АСЛОТУ на предприятиях и учреждениях различных сфер деятельности перечисленные факторы проявляются по-разному, поэтому и средняя величина снижения затрат топливно-энергетических ресурсов неодинакова – по учреждениям здравоохранения и образования она составляет 1,5 раза, по промышленным и сельскохозяйственным предприятиям – соответственно 1,8 и 1,6 раза, по объектам транспортной инфраструктуры – 1,7 раза.

В Беларуси большинство предприятий построено в послевоенные годы. Они спроектированы из расчета минимальных затрат на последующую их внутреннюю перепланировку и обновление инженерно-технических

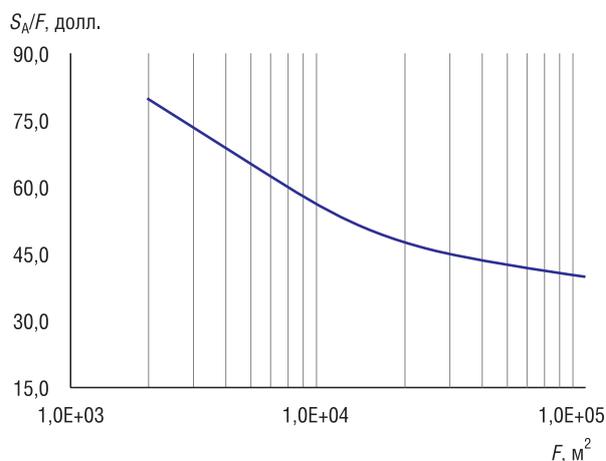


Рис. 2. Зависимость удельной стоимости АСЛОТУ от суммарной площади рабочих зон, оснащаемых ею

Fig. 2. Dependence of the unit cost of ASLOTU on the total area of the working areas equipped with it

коммуникаций. Корпуса этих предприятий представляют собой многоэтажные или одноэтажные здания широкой застройки; в них легко решается вопрос выделения помещений посредством сборно-разборных перегородок. Многоэтажность дает возможность организовать технологические процессы как по горизонтали, так и по вертикали. Такие корпуса экономически намного выгоднее одноэтажных с традиционным отоплением – при одинаковых производственных мощностях площадь, отведенная под технологический процесс, у них меньше на 20 %, протяженность внутрикорпусных коммуникаций – на 50 %, почти в 3 раза ниже расход энергии на отопление [26].

Сравнительно небольшой градиент температуры по высоте цеха, имеющий место при функционировании АСЛОТУ (менее 0,2 К/м против 1,5 К/м при традиционном отоплении), позволяет организовывать технологические процессы по вертикали и в одноэтажных корпусах, получая показатели не хуже, чем в многоэтажных. Подтверждением этому являются результаты совместного внедрения АСЛОТУ и вертикальных технологических линий по производству ободьев на Бобруйском заводе тракторных деталей и агрегатов и по нанесению эмали на проволоку в СОО «Гомелькабель».

Строительство заводских корпусов в Беларуси осуществлялось из стандартных сборных железобетонных конструкций по типовым проектам. Такие здания при использовании АСЛОТУ еще длительное время морально не устареют, обеспечивая в полном объеме требования, предъявляемые к технологиям пятого и шестого укладов.

Срок окупаемости АСЛОТУ. Внедрение АСЛОТУ в Беларуси относится к энергосберегающим мероприятиям. Срок окупаемости t , то есть отрезок времени, за который прибыль от реализации таких мероприятий становится равной сумме вложенных денег и понесенных затрат, определяется без учета изменения ценности затраченных средств, как отношение капитальных вложений K к экономическому эффекту за год E . В соответствии с этим исходные формулы для расчета сроков окупаемости АСЛОТУ и традиционной отопительной системы принимают следующий вид:

$$t_A = \frac{K_A}{E_A}; t_T = \frac{K_T}{E_T}. \quad (3)$$

Здесь и далее литерой «А» отмечены величины, относящиеся к АСЛОТУ; «Т» – к традиционной системе отопления.

Введем обозначение

$$E_A - E_T = \Delta \tilde{E}, \quad (4)$$

после чего преобразуем исходную формулу (3) для расчета срока окупаемости АСЛОТУ следующим образом:

$$t_A = \frac{K_A}{\frac{K_T}{t_T} + \Delta \tilde{E}}. \quad (5)$$

Разность годовых экономических эффектов от функционирования АСЛОТУ и традиционной системы $\Delta \tilde{E}$ представим в виде четырех составляющих:

$$\Delta \tilde{E} = C(B_T - B_A) + \left(\frac{K_T}{\tau_T} - \frac{K_A}{\tau_A} \right) + (N_T - N_A) + \Delta E, \quad (6)$$

учитывающих различия (в порядке записи в формуле): в затратах на потребляемое топливо, потерях на физический и моральный износ систем, в расходах на обслуживание и эксплуатацию, а также экономический эффект от положительного воздействия ИК-излучения на технологический процесс ΔE , тыс. руб./т. Здесь τ – нормативный срок службы системы, год; B – расход условного топлива за год, т/год; C – расчетная стоимость 1 т у.т., тыс. руб./т; N – издержки за год на обслуживание и эксплуатацию, тыс. руб./год.

Эффект от воздействия ИК-излучения обусловлен многими факторами, как правило:

в промышленности – улучшением качества продукции, увеличением ассортимента, повышением производительности труда;

в животноводстве – снижением падежа, увеличением привесов при прежнем (нормируемом) потреблении кормов, интенсификацией молокоотдачи;

в медицине – реальным уменьшением периода и стоимости как лечения, так и реабилитации, увеличением процента полного выздоровления пациентов;

в сфере образования – улучшением усваиваемости материала в учебных заведениях, снижением заболеваемости детей в дошкольных учреждениях.

Подставив (6) в (5), получим выражение для оценки срока окупаемости АСЛОТУ в зависимости от технико-экономических показателей традиционной отопительной системы, одной из косвенных характеристик которой является срок окупаемости t_T , и эффективности соответствующего ей (не модернизированного) технологического процесса.

Многолетний опыт использования АСЛОТУ в основных отраслях экономики Беларуси показывает, что эксплуатационные затраты (без топливной составляющей) рассматриваемого типа ИК-системы примерно равны соответствующим расходам на функционирование традиционного отопления.

Трудоемкость обслуживания АСЛОТУ (табл. 3) разработана на основании ресурсно-сметных норм, прейскуранта цен на низковольтные устройства и ценника на пуско-наладочные работы и утверждена Национальной академией наук Беларуси.

Частота обслуживания оборудования АСЛОТУ установлена не менее одного раза в год. Квалификация персонала: инженер или техник с опытом обслуживания электронных цифровых систем автоматического управления не менее трех лет; электромонтер не ниже 4-го разряда с опытом обслуживания низковольтного электротехнического оборудования и устройств промышленной автоматики не менее одного года. Затраты времени на работы по обслуживанию АСЛОТУ у инженера (техника) и электромонтера распределяются в соотношении 2 : 1.

При таком регламенте потери на обслуживание инфракрасной и традиционной систем оказываются близкими между собой, и для обоснования инвестиций можно положить $N_A = N_T$.

В случае разработки технико-экономического обоснования целесообразности внедрения АСЛОТУ на новостроящихся объектах принимается:

$$N_A = N_T; K_A = S_A; K_T = S_T, \quad (7)$$

где S_0 – начальная стоимость системы.

В расчетах, аргументирующих замену действующих традиционных отопительных систем на АСЛОТУ, понесенные затраты в результате вывода их из эксплуатации учитываются путем увеличения капитальных вложений:

$$K_A = S_A + W_T + S_T \left(1 - \frac{\tau_T^*}{\tau_T} \right) U \left(1 - \frac{\tau_T^*}{\tau_T} \right). \quad (8)$$

Здесь $U(\cdot)$ – единичная симметричная функция; W_T – затраты на демонтаж или консервацию; τ_T^* – период эксплуатации традиционной системы от ее пуска до демонтажа или консервации.

С конца 1980-х годов все заметнее стала проявляться тенденция снижения срока службы отопительного оборудования, связанная, в основном, с его ускоренным моральным старением. В ближайшее время в Беларуси эта закономерность будет только прогрессировать, что обусловлено переходом на технологии пятого-шестого укладов и постоянно растущими темпами совершенствования производственных операций. Поэтому в методику расчета ИК-системы, одобренной Госстандартом Республики Беларусь (заключение от 13.04.2001 № 02-/2313), были заложены значения t_T , τ_T , равные принятым в Советском Союзе, соответственно 10 и 8 лет, которые не занижают срока окупаемости АСЛОТУ.

Цифровое управление работой АСЛОТУ позволяет путем элементарного ввода в машинный код обновленных данных по микроклимату перестроить ее функционирование в соответствии с требованиями внедряемой технологии. Как менее подверженных моральному старению и не имеющих движущихся частей, срок службы излучателей и сети электроснабжения, следует определять по физическому износу – 30–32 года согласно [27], а блока управления – 8–10 лет, так же как и серийных контроллеров. В итоге получаем, что значение τ_A , рассчитанное с учетом стоимостного веса срока службы каждой составляющей части АСЛОТУ:

№ п/п	Наименование оборудования	Трудоемкость, чел.-час
1	Инфракрасный излучатель одноступенчатый, установленный на высоте до 3 м	0,60
	3–5 м	0,63
	5–8 м	0,65
	свыше 8 м	0,70
2	Инфракрасный излучатель двухступенчатый, установленный на высоте до 3 м	1,0
	3–5 м	1,10
	5–8 м	1,15
	свыше 8 м	1,20
3	Инфракрасный излучатель трехступенчатый, установленный на высоте до 3 м	1,60
	3–5 м	1,70
	5–8 м	1,80
	свыше 8 м	1,85
4	Датчик обратной связи	0,25
5*	Модуль управления параметрами излучения одноканальный	2,0
	двухканальный	2,8
6*	Преобразователь мощности одноканальный	0,7
	двухканальный	1,0
	четырёхканальный	1,7
7*	Шкаф управления параметрами излучения однозонный	2,8
	двухзонный	4,0
	трехзонный	5,0
8*	Шкаф (модуль) плавного регулирования мощности однозонный	0,7
	двухзонный	1,0
	трехзонный	1,2
9	Вводно-распределительное устройство мощностью до 100 кВт	2,8
	100–350 кВт	3,0
	350–600 кВт	3,2
	свыше 600 кВт	3,5
10	Распределительное устройство (защитно-коммутационная аппаратура) с количеством распределительных выключателей до 5	0,45
	5–10	0,7
	свыше 10	1,0

*Оборудование в позициях 5–8 относится к блоку управления.

$$\tau_A = \sum_{i=1}^3 \frac{S_i}{S_A} \tau_i, \quad (9)$$

находится в пределах 25–28 лет. Здесь S_i , τ_i – соответственно начальная стоимость и срок службы i -й части АСЛОТУ.

Рассчитанные по формулам (5)–(9) с учетом значений параметров, оговоренных выше, сроки окупаемости АСЛОТУ для реальных объектов ведущих отраслей экономики Беларуси составляют 2,3–3,4 года. В действительности же они оказались еще меньшими – верхний предел не превышал трех лет.

Проект плана внедрения АСЛОТУ. Привлекательные значения срока окупаемости наряду с приемлемой стоимостью, длительным сроком службы и техническими параметрами, удовлетворяющими малозатратным технологиям пятого-шестого укладов, явились одним из

главных аргументов в пользу начала проработки условий масштабного применения АСЛОТУ в Республике Беларусь. К настоящему времени составлен проект плана внедрения данной ИК-системы. Он создан в соответствии с Концепцией Национальной стратегии устойчивого развития Республики Беларусь на период до 2035 г. (ЧЕЛОВЕК+ЭКОНОМИКА+ЭКОЛОГИЯ) и отвечает целям в области устойчивого развития, сформулированным Организацией Объединенных Наций: №3 хорошее здоровье и благополучие, №4 качественное образование, №8 достойная работа и экономический рост, №9 индустриализация, инновация и инфраструктура [28]. План внедрения АСЛОТУ сориентирован на содействие ускоренному развитию высокотехнологичных секторов национальной экономики, связанных с приоритетными направлениями инновационной деятельности: промышленное производство, обороноспособность, биотехнологии в сельском хозяйстве, обучение, медицина, транспортная инфраструктура. Исходя из этих позиций, определены масштаб и области использования АСЛОТУ. Значения основных показателей данного плана представлены в табл. 4–8.

Производственные и приравненные к ним объекты. АСЛОТУ устанавливается в цехах машиностроительных, станкостроительных, приборостроительных предприятий, на производственных участках заводов точной механики, радиотехнической и электронной продукции, электротехнической, оптико-механической отрасли, в хранилищах и пунктах ремонта и технического обслуживания военной техники.

Т а б л и ц а 4

T a b l e 4

Параметр	Значение		
	Всего	2020–2027 гг.	2028–2035 гг.
Площадь помещений для оснащения системой АСЛОТУ, тыс. м ²	2400,0	1080,0	1320,0
Суммарная установленная мощность АСЛОТУ, МВт	480,0	216,0	264,0
Средняя потребляемая мощность, МВт	за отопительный сезон	99,0	121,0
	вне отопительного сезона	0,0	0,0
Потребляемая энергия, тыс. кВт·ч	за отопительный сезон;	495,0	605,0
	вне отопительного сезона;	0,0	0,0
	всего	1100,0	605,0
Суммарная стоимость АСЛОТУ, млн долл. США	115,0	51,8	63,2

Сельскохозяйственные объекты. АСЛОТУ монтируется в телятниках, в доильных блоках молочных ферм, в цехах доразивания поросят-отъемышей и свинарниках-маточниках свинокомплексов, на птицефабриках в цехах с напольным содержанием бройлеров, в овощных теплицах, в оранжереях с низкорослыми растениями.

Т а б л и ц а 5

T a b l e 5

Параметр	Значение		
	Всего	2020–2027 гг.	2028–2035 гг.
Площадь помещений для оснащения системой АСЛОТУ, тыс. м ²	1405,0	632,0	773,0
Суммарная установленная мощность АСЛОТУ, МВт	340,0	153,0	187,0
Средняя потребляемая мощность, МВт	за отопительный сезон	73,0	89,0
	вне отопительного сезона	29,5	16,0
Потребляемая энергия, тыс. кВт·ч	за отопительный сезон	360,0	440,0
	вне отопительного сезона;	110,0	60,5
	всего	910,0	500,5
Суммарная стоимость АСЛОТУ, млн долл. США	91,0	41,0	50,0

Учреждения образования и социального обеспечения. АСЛОТУ внедряется в школах, лицеях, детских садах, дворцах молодежи, в интернатах, детских домах, в учреждениях для обучения и воспитания детей и подростков с психическими и физическими отклонениями, в домах инвалидов и престарелых.

Т а б л и ц а 6
T a b l e 6

Параметр	Значение		
	Всего	2020–2027 гг.	2028–2035 гг.
Площадь помещений для оснащения системой АСЛОТУ, тыс. м ²	1110,0	499,5	610,5
Суммарная установленная мощность АСЛОТУ, МВт	230,0	103,5	126,5
Средняя потребляемая мощность, МВт за отопительный сезон вне отопительного сезона	115,0	51,0	64,0
	30,0	13,5	16,5
Потребляемая энергия, тыс. кВт·ч за отопительный сезон вне отопительного сезона всего	575,0	258,5	316,5
	100,0	45,0	55,0
	675,0	303,5	371,5
Суммарная стоимость АСЛОТУ, млн долл. США	78,0	35,0	43,0

Учреждения здравоохранения. АСЛОТУ оснащаются операционные, лаборатории, родильные залы, манипуляционные, реанимационные, боксы и палаты для новорожденных, палаты детских отделений, а также отделения хирургии, урологии, гинекологии, лучистой диагностики, гематологии и ожоговые центры.

Т а б л и ц а 7
T a b l e 7

Параметр	Значение		
	Всего	2020–2027 гг.	2028–2035 гг.
Площадь помещений для оснащения системой АСЛОТУ, тыс. м ²	460,0	207,0	253,0
Суммарная установленная мощность АСЛОТУ, МВт	115,0	51,5	63,5
Средняя потребляемая мощность, МВт за отопительный сезон вне отопительного сезона	58,0	26,0	32,0
	23,0	10,0	13,0
Потребляемая энергия, тыс. кВт·ч за отопительный сезон вне отопительного сезона всего	290,0	130,5	159,5
	85,0	38,5	46,5
	375,0	169,0	206,0
Суммарная стоимость АСЛОТУ, млн долл. США	41,0	18,5	22,6

Объекты транспортной инфраструктуры. АСЛОТУ размещается в залах ожидания железнодорожных и автобусных вокзалов и станций.

Т а б л и ц а 8
T a b l e 8

Параметр	Значение		
	Всего	2020–2027 гг.	2028–2035 гг.
Площадь помещений для оснащения системой АСЛОТУ, тыс. м ²	90,0	40,5	49,5
Суммарная установленная мощность АСЛОТУ, МВт	20,0	9,0	11,0
Средняя потребляемая мощность, МВт за отопительный сезон вне отопительного сезона	9,0	4,0	5,0
	0,0	0,0	0,0
Потребляемая энергия, тыс. кВт·ч за отопительный сезон вне отопительного сезона всего	45,0	20,5	24,5
	0,0	0	0
	45,0	20,5	24,5
Суммарная стоимость АСЛОТУ, млн долл. США	5,3	2,4	2,9

Заклучение. При существующем спектре потребностей в тепле и электричестве ввод в эксплуатацию БелАЭС приведет к вытеснению из базовой зоны графика нагрузки части электроэнергии ТЭЦ, вырабатываемой в экономичном теплофикационном режиме. Поэтому уже сейчас намечаются технические мероприятия, способствующие поддержанию оптимального соотношения между выработкой электроэнергии и тепла в зимний период времени.

Внедрение ИК-систем АСЛОТУ, потребляющих электроэнергию в основном в холодный период года, позволяет частично решить эту проблему. Полностью она может быть снята при плановом переводе на электроотопление части объектов ЖКХ, которые в настоящее время дают солидную добавку в потребление тепла зимой. При этом приоритет должны иметь решения, способствующие повышению комфортности в квартирах. Рыночная экономика подталкивает к этому, вынуждая предоставлять потребителю выбор между стоимостью и уровнем комфорта.

Данная политика в сфере отопления ЖКХ обоснована вескими объективными причинами. Нынешний экономический рост вызван бурным развитием информационных технологий. Последующий подъем экономики специалисты связывают с укреплением здоровья людей, созданием условий для восстановления и, главное, снятия умственной усталости от напряженного труда на производстве пятого-шестого технологических укладов. В данный момент и в перспективе лишь электрическое отопление способно обеспечить высокие гигиенические показатели микроклимата и комфортную обстановку в жилых помещениях. Для этого будут использоваться как конвекторы, так и ИК-системы, функционирующие по алгоритму АСЛОТУ.

Широкомасштабное внедрение АСЛОТУ в Беларуси уже в ближайшее время потребует специальных подготовительных мероприятий, прежде всего внесение изменений в нормативно-правовые акты, регламентирующие внедрение АСЛОТУ и приведение тарифов на электричество и тепло в соответствие с затратами условного топлива на их выработку. Вместе с этим следует проводить информационную и разъяснительную работу на предприятиях и в учреждениях – потенциальных потребителях этой системы, организовать переподготовку проектировщиков, энергоаудиторов, работников Главгосстройэкспертизы, энергетиков, инженеров – эксплуатационников АСЛОТУ, разработав для этого программы обучения, методические и наглядные пособия, тренажеры.

Министерства энергетики, экономики и образования Республики Беларусь, Национальная академия наук Беларуси, Государственный комитет по науке и технологиям, Государственный комитет по стандартизации Республики Беларусь обладают должным научно-техническим и кадровым потенциалом для практической реализации перечисленных мероприятий.

Список использованных источников

1. Вдовина, А. А. Понятие «технологического уклада» в системе экономических категорий и новые технологические уклады общественного развития / А. А. Вдовина // Креативная экономика. – 2019. – Т. 13, №4. – С. 605–618. <http://doi.org/10.18334/ce.13.4.40522>
2. Авербух, В. М. Шестой технологический уклад и перспективы России / В. М. Авербух // Вестн. Ставропол. гос. ун-та. – 2010. – № 7. – С. 159–166.
3. Шесть технологических укладов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://general-skokov.livejournal.com/24586.html> – Дата доступа: 10.01.2020.
4. Андреева, М. Е. Технологические уклады в современной экономике [Электронный ресурс] / М. Е. Андреева. – Екатеринбург: УрФу, 2016. – Режим доступа: https://study.urfu.ru/Aid/Publication/13457/1/Andreeva_0.pdf – Дата доступа: 10.01.2020.
5. Глазьев, С. Ю. Новый технологический уклад в современной мировой экономике / С. Ю. Глазьев // Междунар. экономика. – 2010. – № 5. – С. 5–27.
6. Чижик, С. А. Аддитивные технологии: современное состояние и перспективы / С. А. Чижик // Материалы 8-й Междунар. науч.-техн. конф. «Приборостроение – 2015». – Минск: БНТУ, 2015. – Т. 1. – С. 3–4.
7. Аддитивные технологии – динамично развивающееся производство [Электронный ресурс] / О. Н. Гончарова [и др.] // Инженер. вестн. Дона. – 2016. – № 4. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3931> – Дата доступа: 21.01.2020.
8. Паньшин, Б. Цифровая экономика: особенности и тенденции развития / Б. Паньшин // Наука и инновации. – 2016. – № 3 (157). – С. 17–20.
9. Головенчик, Г. Г. Цифровая экономика как новый этап глобализации / Г. Г. Головенчик // Цифровая трансформация. – 2018. – № 1(2). – С. 26–36.
10. Семенов, Е. Ю. Технологические уклады в экономике и инновационный потенциал развития России / Е. Ю. Семенов, С. А. Козин // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. – 2010. – № 5 (45). – С. 327–331.

11. Зубрицкий, А. Ф. Научное обеспечение развития новейших технологических укладов в Республике Беларусь / А. Ф. Зубрицкий, Н. Ф. Зеньчук, И. А. Зубрицкая // *Новости науки и технологий*. – 2017. – №4 (43). – С. 35–41.
12. Key world energy statistics [Electronic resource]. – IEA Publications, 2019. – Mode of access: <https://webstore.iea.org/key-world-energy-statistics-2019> – Date of access: 14.01.2020.
13. Макроэкономика [Электронный ресурс] / Ин-т экономики и права Ивана Кушнера. – Режим доступа: <http://be5.biz/makroekonomika/index.html> – Дата доступа: 15.01.2020.
14. ВВЭР с микротвэлами: отчет о НИР [Электронный ресурс] / ВНИИАМ; рук. Л. Н. Фальковский. – М., 2003. – Режим доступа: <http://www.vniiam.narod.ru> – Дата доступа: 23.01.2020.
15. О возможности продления срока службы реактора ВВЭР-440 за счет использования ТВС с микротвэлами / Е. И. Гришанин [и др.] // Сб. тр. 11-й Междунар. науч.-техн. конф. «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики». – М.: Росэнергоатом, 2018. – С. 78–81.
16. Пономарев-Степной, Н. Микротвэлами против ядерных катастроф и терроризма [Электронный ресурс] / Н. Пономарев-Степной, Е. Гришанин, Н. Кухаркин // *Промышленные ведомости*. – 2001. – № 18 (29). – https://www.promved.ru/oct_2001_04.shtml – Дата доступа: 14.01.2020.
17. Гришанин, Е. И. Антитеррористическое топливо для АЭС / Е. И. Гришанин // *Атомная стратегия*. – 2007. – № 29. – С. 15.
18. Ахрамович, А. П. Методология расчета двухфункциональной инфракрасной системы АСЛОТУ / А. П. Ахрамович, Г. М. Дмитриев, В. П. Колос // *Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук*. – 2013. – № 1. – С. 71–76.
19. Дмитриев, Г. М. Базовая модель сопряженного расчета оптимальных параметров системы инфракрасного обогрева цехов приборостроительных предприятий: дис. ... канд. техн. наук : 01.04.14 / ГНУ «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» НАН Беларуси. – Минск, 2003. – 165 л.
20. Зуев, В. Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере / В. Е. Зуев. – М.: Совет. радио, 1970. – 496 с.
21. Гольдштик, М. А. Вихревые потоки / М. А. Гольдштик. – Новосибирск: Наука, 1981. – 366 с.
22. Мачкаши, А. Лучистое отопление / А. Мачкаши, Л. Банхиди. – М.: Стройиздат, 1985. – 484 с.
23. Ахрамович, А. П. Электрические ИК-излучатели средней удельной мощности. О целесообразности прямого электроотопления / А. П. Ахрамович, Г. М. Дмитриев, В. П. Колос // *Энергоэффективность*. – 2006. – № 12. – С. 14–17.
24. Брамсон, М. А. Инфракрасное излучение нагретых тел / М. А. Брамсон. – М.: Наука, 1964. – 223 с.
25. Излучательные свойства твердых материалов / под ред. А. Е. Шейндлина. – М.: Энергия, 1974. – 471 с.
26. Михайлов, Г. Н. Проблема комплексности в проектировании промышленных предприятий / Г. Н. Михайлов // *Промышленное строительство*. – 1980. – № 8. – С. 10–18.
27. Богуславский, Л. Д. Снижение расхода энергии при работе систем отопления и вентиляции / Л. Д. Богуславский. – М.: Стройиздат, 1985. – 336 с.
28. Беларусь на пути достижения целей устойчивого развития. – Минск: Нац. стат. ком. Респ. Беларусь, 2019. – 30 с.

Reference

1. Vdovina A. A. The concept of “technological structure” in the system of economic categories and new technological structures of social development. *Kreativnaya ekonomika = Creative Economy*, 2019, vol. 13, no. 4, pp. 605–618 (in Russian). <http://doi.org/10.18334/ce.13.4.40522>
2. Averbukh V. M. The sixth technological setup and Russian perspectives. *Vestnik Stavropol'skogo gosudarstvennogo universiteta* [Proceedings of Stavropol State University], 2010, no. 7, pp. 159–166 (in Russian).
3. *The Sixth Technological Setup*. Available at: <https://general-skokov.livejournal.com/24586.html> (accessed 10 January 2020) (in Russian).
4. Andreeva M. E. *Technological Setup in the Modern Economy*. Ekaterinburg, 2016. Available at: https://study.urfu.ru/Aid/Publication/13457/1/Andreeva_0.pdf (accessed 10 January 2020) (in Russian).
5. Glaz'ev S. Yu. The new technological setup in the world economy. *Mezhdunarodnaya ekonomika = World Economics*, 2010, no. 5, pp. 5–27 (in Russian).
6. Chizhik S. A. Additive technologies: current status and prospects. *Materialy 8-i Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii “Priborostroenie – 2015”* [Reports of 8th International Scientific Conference “Instrumentation Engineering – 2015”]. Minsk, Belarusian National Technical University, 2015, vol. 1, pp. 3–4 (in Russian).
7. Goncharova O. N. Additive technologies – a dynamically developing production. *Inzhenernyi vestnik Dona = Engineering Journal of Don*, 2016, no. 4. Available at: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3931> (accessed 21 January 2020) (in Russian).
8. Pan'shin B. Digital economy: features and development trends. *Nauka i innovatsii = Science and Innovation*, 2016, no. 3 (157), pp. 17–20 (in Russian).
9. Goloventchik G. G. Digital economy as a new stage of globalization. *Tsifrovaya transformatsiya = Digital Transformation*, 2018, no. 1 (2), pp. 26–36 (in Russian).
10. Semenov E. Yu., Kozin S. A. Technological setup in economy and innovative potential of Russian development. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2010, no. 5 (45), pp. 327–331 (in Russian).
11. Zubritsky A. F., Zubritskaya I. A. Scientific support of the development of advanced technological setup in the Republic of Belarus. *Novosti nauki i tekhnologii* [Science and Technology News], 2017, no. 4 (43), pp. 35–41 (in Russian).

12. *Key world energy statistics*. IEA Publications, 2019. Available at: <https://webstore.iea.org/key-world-energy-statistics-2019> (accessed 14 January 2020) (in Russian).
13. Ivan Kushner' Institute of Economics and Law. *Macroeconomics*. Available at: <http://be5.biz/makroekonomika/index.html> (accessed 15 January 2020) (in Russian).
14. Fal'kovskii L.N. *WWER with micro fuel particles: Report on Research*. Moscow, 2003. Available at: vniiam.narod.ru/rus2/vvr.doc (accessed 21 January 2020) (in Russian).
15. Grishanin E. I., Alekseev P. N., Kelin G. E., Padun S. P., Fonarev B. I. Possibility of the life extending of the WWER-440 reactor by using the fuel assemblies with micro fuel particles. *Sbornik trudov 11-i Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Bezopasnost', effektivnost' i ekonomika atomnoi energetiki"* [Proceedings of the 11th International Scientific and Technical Conference "Safety, Efficiency and Economics of Nuclear Energy"]. Moscow, Rosenergoatom Publ., 2018, pp. 78–81 (in Russian).
16. Ponomarev-Stepnoy N., Grishanin E., Kuharkin N. Microfuel particles against nuclear disasters and terrorism. *Promyshlennye vedomosti* [Industry News], 2001, no. 18 (29). Available at: https://www.promved.ru/oct_2001_04.shtml (accessed 14 January 2020) (in Russian).
17. Grishanin E. I. Antiterrorist fuel for nuclear power plants. *Atomnaya strategiya* [Nuclear Strategy], 2007, no. 29, p. 15 (in Russian).
18. Akhramovich A. P., Dmitriev G. M., Kolos V. P. Methodology for calculating of the two-function infrared system ASLOTU. *Vesti Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2013, no. 1, pp. 71–76 (in Russian).
19. Dmitriev G. M. *The Basic Model for the Adjoint Calculation of the Infrared Heating System Optimal Parameters for the Instrument-Making Enterprises Workshops*. Minsk, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny, 2003. 165 p. (in Russian).
20. Zuev V. E. *Propagation of Visible and Infrared Waves in the Atmosphere*. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1970. 496 p. (in Russian).
21. Gol'dstick M. A. *Vortex Flows*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1981. 366 p. (in Russian).
22. Machkashy A., Banhidly L. *Radiant Heating*. Moscow, Stroiizdat Publ., 1985. 484 p. (in Russian).
23. Akhramovich A. P., Dmitriev G. M., Kolos V. P. Electric infrared radiant of medium specific power. Feasibility of direct electric heating. *Energoeffektivnost' = Energy Efficiency*, 2006, no. 12, pp. 14–17 (in Russian).
24. Bramson M. A. *Infrared Radiation of Heated Bodies*. Moscow, Nauka Publ., 1964. 223 p. (in Russian).
25. Sheindlin A. E., ed. *Radiative Properties of Solid Materials*. Moscow, Energiya Publ., 1974. 471 p. (in Russian).
26. Mihailov G. N. Problem of complexity in the design of industrial enterprises. *Promyshlennoe stroitel'stvo* [Industrial Engineering], 1980, no. 8, pp. 10–18 (in Russian).
27. Boguslavskii L. D. *Reduced Energy Consumption during Operation of Heating and Ventilation Systems*. Moscow, Stroiizdat Publ., 1985. 336 p. (in Russian).
28. *Belarus on the Way of Achieving Sustainable Development Goals*. Minsk, National Statistical Committee of the Republic of Belarus, 2019. 30 p. (in Russian).

Информация об авторах

Ахрамович Александр Павлович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 15, корп. 2, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ahral2012@mail.ru

Войтов Игорь Витальевич – доктор технических наук, ректор, Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: rektor@belstu.by

Колос Валерий Павлович – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 65, корп. 2, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kolosvp@mail.ru

Information about the authors

Aliaksandr P. Akhramovich – Ph. D. (Engineering), Leading Researcher, Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (15, building 2, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ahral2012@mail.ru

Igor V. Voitov – D. Sc. (Engineering), Rector, Belorussian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: rektor@belstn.by

Valery P. Kolos – D. Sc. (Physics and Mathematics), Main Researcher, Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (15, building 2, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kolosvp@mail.ru

С. В. Пантелеев, А. Н. Малашин, А. Е. Каледа

Военная академия Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЙ ПОЛИГАРМОНИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РАБОТЫ МНОГОФАЗНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ

Аннотация. Разработана система векторного управления током в цепи многофазной электрической машины. Для этого на основе проведенного анализа электромагнитных процессов в многофазном полупроводниковом преобразователе электрической энергии создана его дискретная математическая модель, которая учитывает перераспределение электромагнитной энергии по отдельным пространственным гармоническим составляющим в зависимости от числа фаз. С использованием данной математической модели и схемы инжекции высших гармоник тока, которая обеспечивает полигармонический режим работы полупроводникового преобразователя, разработан способ независимого управления пространственными гармоническими составляющими входного тока преобразователя. Формирование в каждой из фаз полигармонических токов, сопряженных по форме и фазе с питающим преобразователь напряжением, осуществляется посредством управляющих воздействий в виде векторов напряжения полупроводникового коммутатора, реализация которых осуществляется методом многофазной пространственно-векторной модуляции. Для проверки разработанных положений создана имитационная модель девятифазного полупроводникового преобразователя электрической энергии с системой векторного управления. Результаты исследования модели подтвердили адекватность разработанных технических решений, применение которых позволит обеспечить наиболее полную реализацию собственных преимуществ многофазной электрической машины в целях общего улучшения массогабаритных и энергетических показателей автономной системы электроснабжения.

Ключевые слова: многофазный преобразователь, дискретная математическая модель, векторное управление, преобразование координат, инжекция гармоник

Для цитирования: Пантелеев, С. В. Разработка системы векторного управления полупроводникового преобразователя, обеспечивающей полигармонический режим работы многофазной электрической машины / С. В. Пантелеев, А. Н. Малашин, А. Е. Каледа // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, № 3. – С. 332–340. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-332-340>

Stanislav V. Panteleev, Andrey N. Malashin, Andrey E. Kaleda

Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

DEVELOPMENT OF A VECTOR CONTROL SYSTEM OF THE SEMICONDUCTOR CONVERTER, WHICH WILL PROVIDE A POLYHARMONIC OPERATING MODE OF A POLYPHASE ELECTRIC MACHINE

Abstract. A system for vector control of current in the circuit of a polyphase electric machine has been developed. For this, on the basis of the analysis of electromagnetic processes in a multiphase semiconductor converter of electrical energy, its discrete mathematical model was created, which takes into account the redistribution of electromagnetic energy by individual spatial harmonic components depending on the number of phases. Using this mathematical model and the scheme of injection of higher current harmonics, which provides a polyharmonic mode of operation of a semiconductor converter, a method for independent control of the spatial harmonic components of the input current of the converter has been developed. The formation in each of the phases of polyharmonic currents, conjugated in shape and phase with the voltage supplying the converter, is carried out by means of control actions in the form of voltage vectors of a semiconductor switch, the implementation of which is carried out by the method of multiphase space-vector modulation. To check the developed provisions, a simulation model of a nine-phase semiconductor converter of electrical energy with a vector control system was created. The results of the study of the model confirmed the adequacy of the developed technical solutions, the use of which will ensure the most complete realization of the own advantages of a multiphase electric machine in order to generally improve the weight, size and energy indicators of the autonomous power supply system.

Keywords: multiphase converter, discrete mathematical model, vector control, coordinate transformation, harmonic injection

For citation: Panteleev S. V., Malashin A. N., Kaleda A. E. Development of a vector control system of the semiconductor converter, which will provide a polyharmonic operating mode of a polyphase electric machine. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 3, pp. 332–340 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-332-340>

Введение. Многофазные электромеханические преобразователи энергии имеют следующие преимущества перед традиционными трехфазными электрическими машинами: уменьшение амплитуды и увеличение частоты пульсаций мгновенной мощности (или крутящего момента), снижение потерь от высших гармоник поля возбуждения в электрической машине, уменьшение токов нагрузки при работе в системах большой мощности с ограничением по напряжению, повышенная надежность из-за избыточной структуры, возможность работы электрической машины в полигармоническом режиме [1–10].

При функционировании многофазной ($m > 3$) электрической машины с полигармонической электродвижущей силой (ЭДС) и полупроводникового преобразователя электрической энергии (ППЭЭ) в автономной системе электроснабжения особую сложность вызывает решение задачи согласования во временной области ЭДС и тока для получения максимальной активной мощности электрической машины [1–5].

Особенности многофазной электрической машины как объекта управления, в частности увеличение числа фазных электромагнитных переменных и специфическое перераспределение электромагнитной энергии по отдельным пространственным гармоническим, обуславливают особый подход к синтезу системы управления многофазным ППЭЭ и приводят к необходимости разработки специальных принципов управления и структуры системы регулирования преобразователей [6, 7]. Последние обеспечивают наиболее полную реализацию собственных преимуществ многофазной электрической машины в целях общего улучшения массогабаритных и энергетических показателей системы электроснабжения.

Наиболее распространенным способом управления в многофазных двунаправленных ППЭЭ является система векторного регулирования с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), в которой ориентация вектора входного тока осуществляется по вектору входного напряжения (или ЭДС электрической машины) [8–10]. Однако в таких системах управления ППЭЭ не решена задача сопряжения полигармонической ЭДС и тока первичного источника электрической энергии [10, 11].

Цель настоящей работы – разработать математическую модель многофазного ($m > 3$) двунаправленного ППЭЭ, которая учитывает перераспределение электромагнитной энергии по отдельным пространственным гармоническим составляющим в зависимости от числа фаз; на основе данной модели разработать способ независимого управления пространственными гармоническими составляющими тока в цепи многофазной электрической машины, который обеспечивает формирование в каждой из фаз полигармонических токов, совпадающих по форме и фазе с питающим преобразователь напряжением.

Математическая модель многофазного полупроводникового преобразователя электрической энергии. На рис. 1 представлена функциональная схема m -фазного ППЭЭ, который состоит из мостового полупроводникового коммутатора (ПК), буферных реакторов и буферного сглаживающего конденсатора на выходе полупроводникового преобразователя. Полупроводниковый коммутатор выполнен на полностью управляемых ключах. Ключи обладают двусторонней проводимостью тока при подаче включающего сигнала управления, который формируется блоком управления (БУ). При разработке способа управления ППЭЭ принято допущение о том, что нагрузка имеет линейный характер, что вполне корректно при достаточной емкости буферного сглаживающего конденсатора.

Основой системы векторного управления ППЭЭ является его математическая модель изменения мгновенных токов. С целью упрощения анализа процессов в электромеханических преобразователях энергии переменного тока широко применяется метод преобразования координат. Широкое распространение при анализе процессов в управляемых полупроводниковых преобразователях переменного тока получила неподвижная декартова система координат $\alpha_h\beta_h$, $h = 1 \dots (m - 1)/2$.

Преобразование m -фазной системы координат в систему неподвижных декартовых координат называется преобразованием Кларка. Такое преобразование осуществляется из условия инвариантности мощности в исходных и преобразованных системах координат [12]. При этом взаимосвязь номера гармоники ν входного напряжения (тока) ППЭЭ с номером h плоскости ортогональных координат $\alpha_h\beta_h$ определяется выражениями [12]:

$$\begin{aligned} \nu &= 2mk \pm h, \quad k = 0, 1, 2, \dots \text{ при } h \text{ нечетном,} \\ \nu &= 2mk \pm (m - h), \quad k = 0, 1, 2, \dots \text{ при } h \text{ четном.} \end{aligned} \quad (1)$$

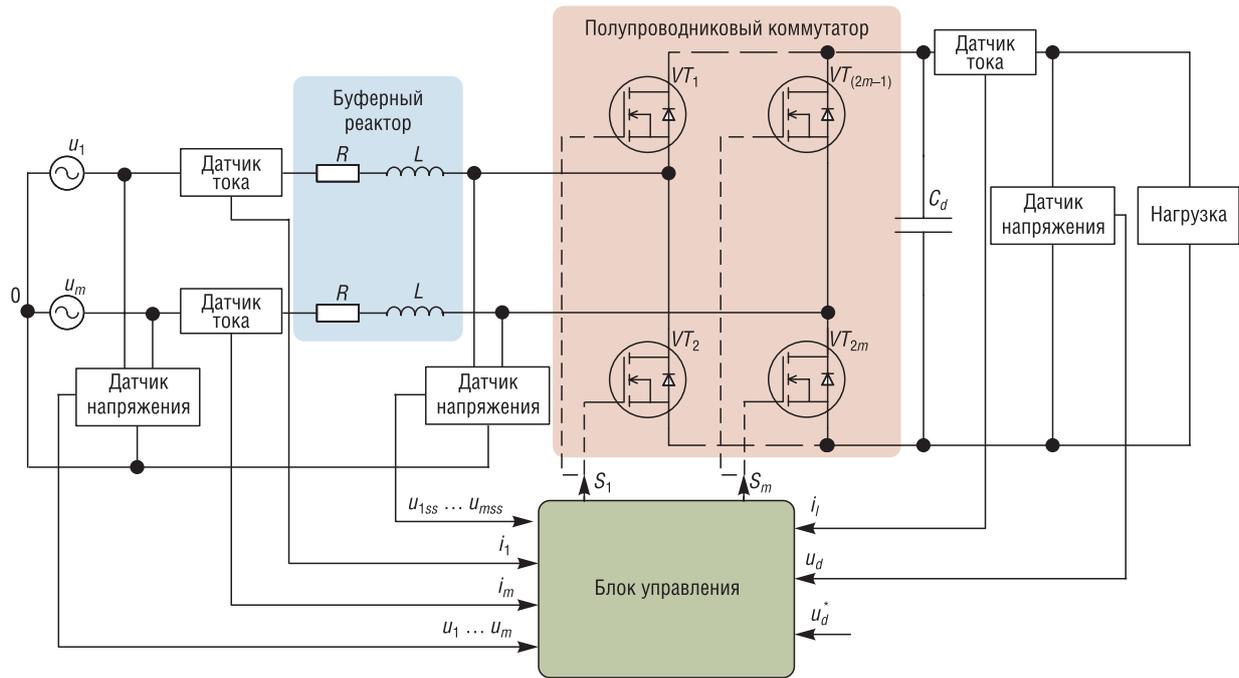


Рис. 1. Функциональная схема m -фазного полупроводникового преобразователя электрической энергии
 Fig. 1. Functional diagram of the m -phase semiconductor converter of electrical energy

Для описания электромагнитных процессов в m -фазном полупроводниковом преобразователе введены алгебраические векторы-столбцы мгновенных значений сетевых напряжений \bar{U}_h и токов \bar{I}_h , напряжений на силовом входе ПК \bar{U}_{ssh} , дискретных коммутационных переменных \bar{S}_{ih} для каждой двумерной ортогональной неподвижной системы координат $\alpha_h\beta_h$. С учетом отсутствия нулевой последовательности в симметричных m -фазных системах векторы для h -й системы координат примут вид

$$\bar{U}_h = [u_{\alpha_h} \quad u_{\beta_h}]^T; \bar{I}_h = [i_{\alpha_h} \quad i_{\beta_h}]^T; \bar{U}_{ssh} = [u_{ss\alpha_h} \quad u_{ss\beta_h}]^T; \bar{S}_{ih} = [s_{\alpha_h} \quad s_{\beta_h}]^T. \quad (2)$$

На основе проведенного анализа электромагнитных процессов ППЭЭ [14] математическую модель многофазного такого преобразователя при i -й комбинации состояния ключей для каждой двумерной ортогональной неподвижной системы координат $\alpha_h\beta_h$ можно представить в виде системы уравнений в декартовых неподвижных системах координат следующим образом:

$$\bar{U}_h = \bar{U}_{ssih} + R\bar{I}_h + L_h \frac{d\bar{I}_h}{dt}; \quad (3)$$

$$\bar{U}_{ssih} = \bar{\Phi}_{ih} u_d; \quad (4)$$

$$\bar{\Phi}_{ih} = \frac{1}{2} T^{-1} M T \bar{S}_{ih}; \quad (5)$$

$$i_d = \frac{m}{2} \sum_{h=1}^{(m-1)/2} \bar{\Phi}_{ih} \bar{I}_h; \quad (6)$$

$$i_d = i_f + i_i; \quad (7)$$

$$i_f = C_d \frac{du_d}{dt}; \quad (8)$$

где $R = \text{diag}\{r, r, \dots, r\}$ и $L_h = \text{diag}\{l_h, l_h, \dots, l_h\}$ – матрицы (размерностью $m \times m$) активных сопротивлений и индуктивности буферных реакторов; u_d – выходное напряжение ППЭЭ; $\bar{\Phi}_{ih} = [\varphi_{\alpha_h} \quad \varphi_{\beta_h}]^T$ – дискретная коммутационная вектор-функция; T – матрица преобразования

Кларка [12]; $M = \frac{1}{m} \begin{bmatrix} (m-1) & -1 & -1 & \dots & -1 \\ -1 & (m-1) & -1 & \dots & -1 \\ -1 & -1 & (m-1) & \dots & -1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & (m-1) \end{bmatrix}$ – матрычная константа размерностью

$m \times m$; i_d – выходной ток ППЭЭ; i_l – ток нагрузки ППЭЭ; i_f – ток в цепи емкостного фильтра C_d .

Выражение (4) устанавливает взаимосвязь между напряжением на силовом входе ПК и выпрямленным напряжением. С физической точки зрения напряжения на силовом входе ПК в цепи переменного тока формируются в результате инвертирования напряжения на конденсаторе C_d в цепи постоянного тока.

Соотношение (5) устанавливает взаимосвязь дискретной коммутационной вектор-функции с состояниями ключей.

Выражение (6) получено из уравнения баланса активных мощностей на входе и выходе ППЭЭ с учетом допущения о том, что активные потери в полупроводниковом преобразователе намного меньше общей потребляемой им активной мощности [15]:

$$\sum_{h=1}^{(m-1)/2} (I_h^2 R) \ll \sum_{h=1}^{(m-1)/2} \left(\frac{m}{2} \operatorname{Re} [\bar{U}_h \hat{I}_h] \right), \tag{9}$$

где $\hat{}$ – обозначение сопряженного значения вектора, I_h – модуль вектора входного тока h -й системы координат.

Условие (9) на практике выполняется для большинства режимов функционирования полупроводникового преобразователя электрической энергии.

Способ управления многофазным полупроводниковым преобразователем электрической энергии. Дифференциальное уравнение ППЭЭ (3) должно быть дискретизировано для использования в качестве дискретной модели. Дискретизация производится путем аппроксимации производной как разницы за один период управления:

$$\frac{d}{dt} \bar{I}_h(t) \approx \frac{1}{T_s} [\bar{I}_h(k+1) - \bar{I}_h(k)]. \tag{10}$$

Уравнение дискретного времени (3), записанное относительно сетевого тока и полученное путем дискретизации для периода управления T_s (10), примет вид

$$\bar{I}_h(k+1) - \bar{I}_h(k) = \frac{T_s}{L_h} (\bar{U}_h(k) - \bar{U}_{ssh}(k) - R\bar{I}_h(k)), \tag{11}$$

где $\bar{I}_h(k+1)$ – вектор сетевого тока в начале следующего периода управления для определенного в текущем периоде управляющего воздействия в виде вектора напряжения полупроводникового коммутатора $\bar{U}_{ssh}(k)$.

В математической модели (11) период сетевого напряжения на три порядка меньше периода управления T_s , поэтому принято допущение о том, что $\bar{U}_h(k+1) \approx \bar{U}_h(k)$ [15, 16].

Поскольку целью управления является обеспечение соответствия значений мгновенных токов их заданным значениям, в следующем периоде управления $\bar{I}_h^*(k+1) = \bar{I}_h(k+1)$, выражение (11) с учетом малых значений эквивалентного активного сопротивления $R \approx 0$ входной цепи ППЭЭ, записанное относительно требуемого вектора напряжения ПК, примет вид

$$\bar{U}_{ssh}(k) = \bar{U}_h(k) - \frac{L_h}{T_s} [\bar{I}_h^*(k+1) - \bar{I}_h(k)]. \tag{12}$$

В связи с тем что в ППЭЭ регулирование напряжения в звене постоянного тока и коэффициентов мощности h -й плоскости в звене переменного тока осуществляется путем управления активной и реактивной мощностью преобразователя, то уравнения для определения заданных значений h -го вектора входного тока целесообразно записывать во вращающихся ортогональных системах координат $x_h y_h$ (связанных вещественной осью x_h с вектором питающего напряжения \bar{U}_h).

Заданные значения «реактивных» составляющих h векторов входного тока $i_{y_h}^*(k+1)$ принимаются равными нулю для обеспечения близкого к единице коэффициента мощности [14, 15]. Сигнал заданного значения «активной» составляющей вектора входного тока $i_x^*(k)$ ППЭЭ, необходимой для компенсации ошибки напряжения постоянного тока, формируется регулятором напряжения постоянного тока [14].

Заданные значения «активных» составляющих h -го вектора входного тока $i_{x_h}^*(k)$ при $h > 1$ определяются на основе «активной» составляющей вектора входного тока при $h = 1$ с использованием весовых коэффициентов C_h :

$$i_{x_h}^*(k) = C_h i_{x_1}^*(k). \quad (13)$$

Весовые коэффициенты C_h рассчитываются на основе значений модулей векторов входного напряжения ППЭЭ $U_h(k)$ согласно выражению

$$C_h = \frac{U_h(k)}{U_1(k)}. \quad (14)$$

При этом заданное значение «активной» составляющей тока $i_{x_1}^*(k)$ определяется как функция полученного регулятором напряжения постоянного тока заданного значения «активной» составляющей тока $i_x^*(k)$:

$$i_{x_1}^*(k) = \frac{i_x^*(k)}{\sum_{h=1}^{(m-1)/2} C_h}. \quad (15)$$

Последовательность операций (13)–(15) является схемой инъекции высших гармоник тока.

Если ошибка напряжения постоянного тока считается постоянной в течение двух последовательных периодов дискретизации, то заданное мгновенное значение «активной» составляющей вектора входного тока в следующий период дискретизации $i_{x_h}^*(k+1)$ можно оценить, используя линейную экстраполяцию, как показано на рис. 2.

Заданные значения «активной» и «реактивной» составляющих вектора входного тока ППЭЭ с учетом оценки методом линейной экстраполяции определяются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} i_{x_h}^*(k+1) &= 2i_{x_h}^*(k) - i_{x_h}^*(k-1); \\ i_{y_h}^*(k+1) &= i_{y_h}^*(k). \end{aligned} \quad (16)$$

На основе проведенного анализа электромагнитных процессов m -фазного ППЭЭ разработана схема его регулирования, которая позволяет независимо управлять пространственными векторами входного тока в различных $\alpha_h\beta_h$ -плоскостях, тем самым обеспечивая формирование в каждой из фаз полигармонических токов, синфазных с питающим ППЭЭ напряжением. Функциональная схема регулирования ППЭЭ (рис. 3) выполнена на основе принципов подчиненного регулирования и векторного управления вектором входного тока \bar{I}_h ППЭЭ.

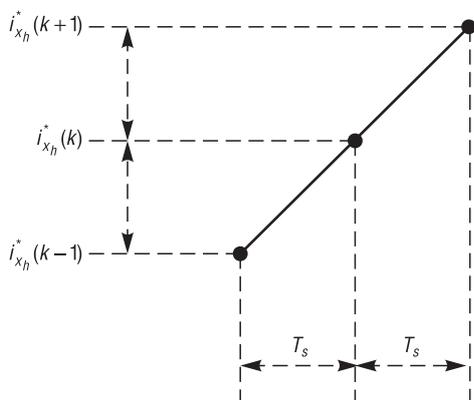


Рис. 2. Оценка заданного мгновенного значения «активной» составляющей h -го вектора входного тока $i_{x_h}^*(k+1)$

Fig. 2. Estimation of a given instantaneous value of the «active» component of the h -th input current vector $i_{x_h}^*(k+1)$

В разработанной системе управления для обеспечения полигармонического режима работы полупроводникового преобразователя электрической энергии разработана схема инъекции высших гармоник тока. Основой разработанной системы векторного управления ППЭЭ является его дискретная математическая модель изменения мгновенных значений входного тока (12). На ее основе в начале каждого периода управления определяется управляющее воздействие в виде векторов напряжения полупроводникового коммутатора, позволяющих компенсировать отклонение вектора входного тока ППЭЭ в конце периода управления.

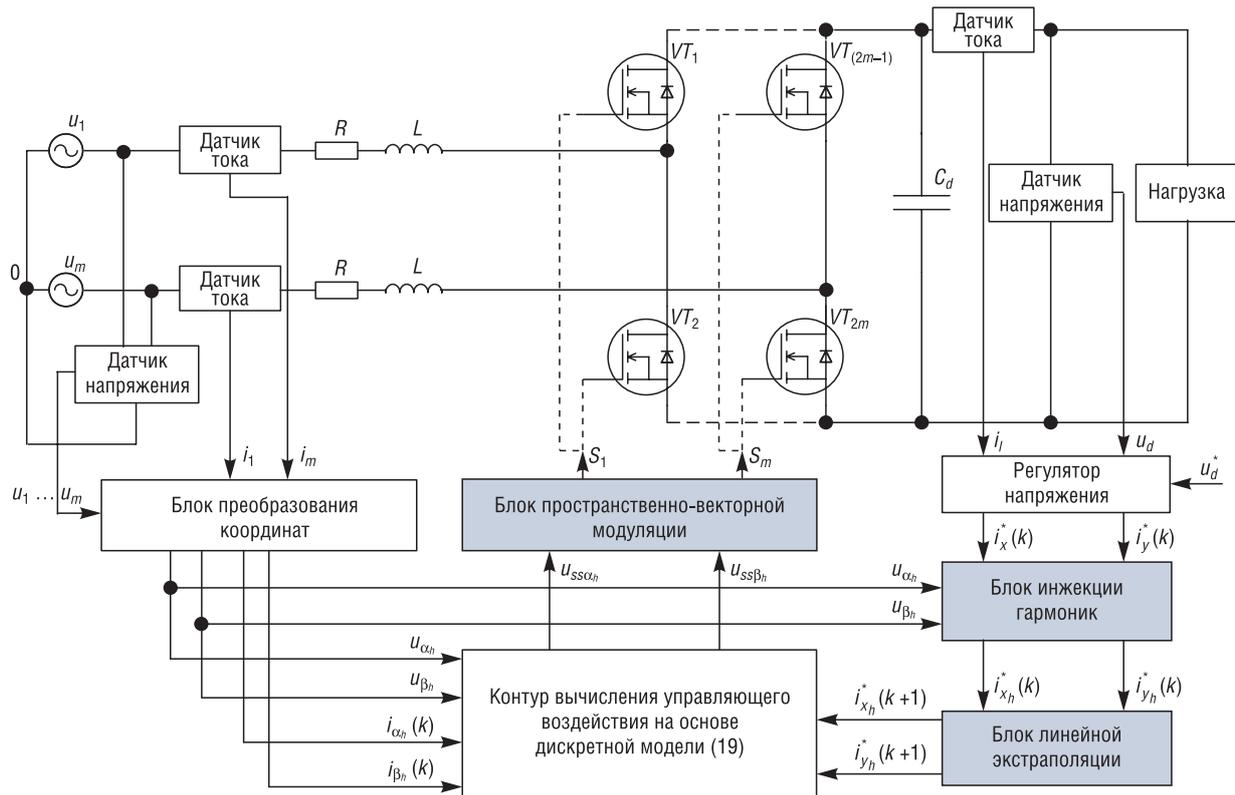


Рис. 3. Функциональная схема регулирования полупроводникового преобразователя электрической энергии
 Fig. 3. Functional diagram of regulation of a semiconductor converter of electrical energy

С целью реализации управляющих воздействий для обеспечения независимого управления пространственными гармоническими составляющими входного тока полупроводникового преобразователя ранее разработан алгоритм многофазной пространственно-векторной модуляции [17].

Результаты моделирования. Для проверки разработанных положений в среде MatLab Simulink проведено исследование имитационной модели девятифазного полупроводникового преобразователя электрической энергии с системой векторного управления (см. рис. 3) со следующими параметрами: источник полигармонического напряжения питания с действующим фазным напряжением $u_m = 220$ В и частотой $f = 60$ Гц; относительные значения амплитуд (14) третьей $C_3^u = 0,33$, пятой $C_4^u = 0,2$ и седьмой $C_2^u = 0,15$ гармоник фазного напряжения (рассмотрен случай предельного содержания высших гармоник); заданное выходное напряжение ППЭЭ $u_d^* = 800$ В; тактовая частота широтно-импульсного модулятора $f_T = 5$ кГц; номинальная выходная мощность ППЭЭ $P_a = 200$ кВт; индуктивность реакторов фаз $L = 0,45$ мГн; емкость выходного конденсатора $C_d = 20$ мФ.

Осциллограммы выходного тока и напряжения на рис. 4 иллюстрируют включение преобразователя с нагрузкой $P_a = 200$ кВт.

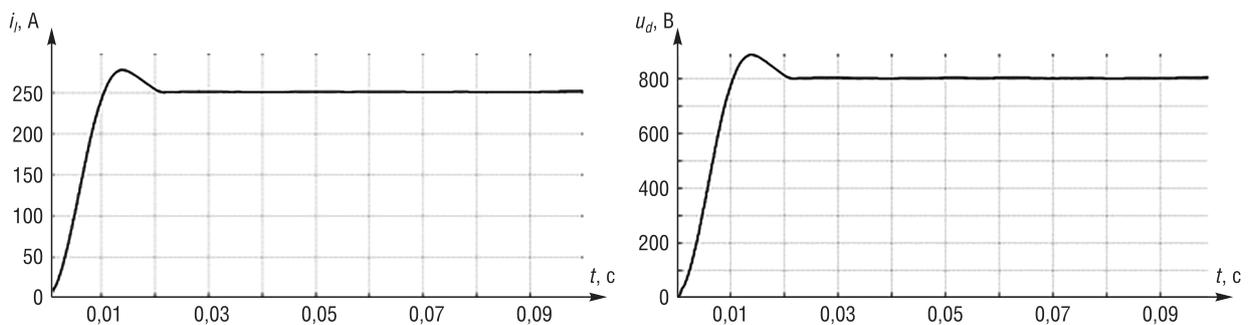


Рис. 4. Осциллограммы тока и напряжения на выходе полупроводникового преобразователя электрической энергии
 Fig. 4. Oscillograms of current and voltage at the output of a semiconductor converter of electrical energy

На рис. 5 приведены осциллограммы входного фазного напряжения и тока ППЭЭ при заданной нагрузке (слева), а также осциллограмма фазного напряжения, которое формируется полупроводниковым коммутатором посредством разработанного алгоритма пространственно-векторной модуляции (справа).

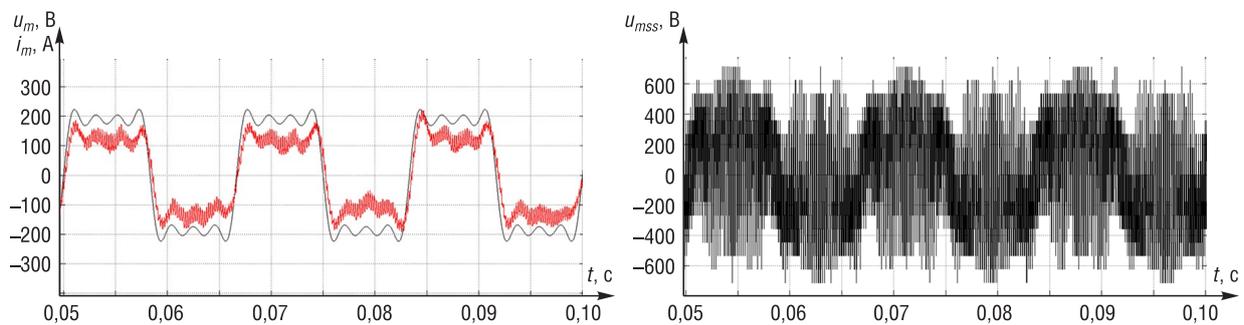


Рис. 5. Осциллограммы сигналов полупроводникового преобразователя электрической энергии в звене переменного тока

Fig. 5. Oscillograms of signals of a semiconductor converter of electrical energy in an alternating current link

Из рис. 5 видно, что разработанный способ векторного управления многофазным ППЭЭ учитывает перераспределение электромагнитной энергии по отдельным пространственным гармоническим составляющим, что позволяет обеспечить в каждой из фаз системы полигармонический ток, который по форме и фазе сопряжен с питающим напряжением. Фазные напряжения полупроводникового коммутатора представлены 17-уровневой формой сигнала ($0, \pm u_d/9, \pm 2u_d/9, \dots, \pm 8u_d/9$).

На рис. 6 приведены траектории движения пространственных векторов входного тока ППЭЭ \bar{I}_h в соответствующих $\alpha_h\beta_h$ системах координат.

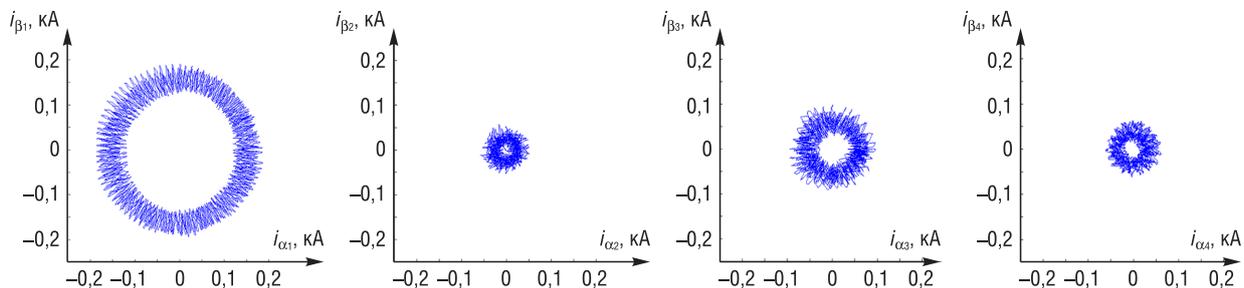


Рис. 6. Траектории движения пространственных векторов входного тока полупроводникового преобразователя электрической энергии в соответствующих $\alpha_h\beta_h$ системах координат

Fig. 6. The motion paths of the spatial vectors of the input current of a semiconductor converter of electrical energy in the corresponding $\alpha_h\beta_h$ coordinate systems

Из рис. 6 видно, что разработанный способ векторного управления многофазным ППЭЭ позволяет обеспечить независимое управление пространственными гармоническими составляющими входного тока преобразователя в различных $\alpha_h\beta_h$ -плоскостях.

Исследование системы векторного управления на имитационной модели выявило достаточную устойчивость ППЭЭ к действию основных дестабилизирующих факторов и параметрических возмущений.

Заключение. Результаты математического моделирования показывают, что разработанный способ векторного управления позволяет решить задачу независимого управления пространственными гармоническими составляющими тока в рабочей обмотке электрической машины и тем самым устранить основные недостатки применения электрических машин с полигармонической ЭДС в системах электроснабжения.

Следовательно, разработанная система управления многофазным полупроводниковым преобразователем электрической энергии (см. рис. 3) позволит реализовать управление током в цепи

электрической машины таким образом, чтобы обеспечить формирование в каждой из фаз полигармонических токов, согласованных по форме и фазе с ЭДС холостого хода электрической машины (см. рис. 5), что позволит уменьшить удельную массу системы электроснабжения.

Список использованных источников

1. Пантелеев, С. В. Повышение энергетических показателей электрической машины путем применения многофазной зубцовой обмотки / С. В. Пантелеев, А. Н. Малашин // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2017. – № 3. – С. 80–86.
2. Голубев, А. Н. Математическая модель синхронного двигателя с многофазной статорной обмоткой / А. Н. Голубев, А. А. Лапин // Электротехника. – 1998. – № 9. – С. 8–13.
3. An enhanced predictive current control method for asymmetrical six-phase motor drives / F. Barrero [et al.] // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2011. – Vol. 58, № 8. – P. 3242–3252. <https://doi.org/10.1109/tie.2010.2089943>
4. Reduction of common-mode voltage in five-phase induction motor drives using predictive control techniques / M. J. Duran [et al.] // IEEE Trans. Ind. Appl. – 2012. – Vol. 48, № 6. – P. 2059–2067. <https://doi.org/10.1109/tia.2012.2226221>
5. Пантелеев, С. В. Математическая модель многофазного магнитоэлектрического генератора с дробными зубцовыми обмотками / С. В. Пантелеев, А. Н. Малашин // Магистерский вестник: сб. науч. тр. магистрантов и аспирантов. – Минск, 2017. – С. 51–58.
6. Голубев, А. Н. Многофазный асинхронный регулируемый электропривод для высокودинамичных систем подвижных установок: дис. ... д-ра техн. наук : 05.09.03 / С.-Петербург. гос. электротехн. ун-т «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова. – СПб., 1994. – 430 л.
7. Лопатин, П. Н. Многофазный асинхронный электропривод для автономных систем: дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Иванов. гос. энергет. ун-т им. В. И. Ленина. – Иваново, 1998. – 278 л.
8. A synchronous current control scheme for multiphase induction motor drives / M. Jones [et al.] // IEEE Trans. Energy Convers. – 2009. – Vol. 24, № 4. – P. 860–868. <https://doi.org/10.1109/tec.2009.2025419>
9. Current control methods for an asymmetrical six-phase induction motor drive / H. S. Che [et al.] // IEEE Trans. Power Electron. – 2014. – Vol. 29, № 1. – P. 407–417. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2248170>
10. Hu, Y. Current control for dual three-phase permanent magnet synchronous motors accounting for current unbalance and harmonics / Y. Hu, Z. Zhu, K. Liu // IEEE Trans. Emerg. Sel. Topics Power Electron. – 2014. – Vol. 2, № 2. – P. 272–284. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2014.2299240>
11. Khan, M. R. MRAS-based sensorless control of a vector controlled five-phase induction motor drive / M. R. Khan, A. Iqbal, M. Ahmad // Electric Power System Research. – 2008. – Vol. 78, № 8. – P. 1311–1321. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2007.11.006>
12. White, D. C. Electromechanical Energy Conversion / D. C. White, H. H. Woodson. – New York: John Wiley and Sons, 1959. – 520 p.
13. Fortescue, C. L. Method of symmetrical coordinates applied to the solution of polyphase networks / C. L. Fortescue // AIEE Trans. – 1918. – Vol. 37, part 2. – P. 1027–1140. <https://doi.org/10.1109/t-aiee.1918.4765570>
14. Ефимов, А. А. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока / А. А. Ефимов, Р. Т. Шрейнер. – Новоуральск: Изд-во НГТИ, 2001. – 250 с.
15. Шрейнер, Р. Т. Математическое описание и алгоритмы ШИМ активных выпрямителей тока / Р. Т. Шрейнер, А. А. Ефимов, А. И. Калыгин // Электротехника. – 2000. – № 10. – С. 42–49.
16. Волков, А. В. Анализ электромагнитных процессов и совершенствование регулирования активного фильтра / А. В. Волков // Электротехника. – 2002. – № 12. – С. 40–48.
17. Пантелеев, С. В. Моделирование m -фазного активного выпрямителя напряжения с пространственно-векторной модуляцией / С. В. Пантелеев, А. Н. Малашин, А. Е. Каледя // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 4. – С. 455–468. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-4-455-468>

References

1. Panteleev S. V., Malashin A. N. Increasing the energy performance of an electric machine by using a multiphase gear winding. *Vestnik Voennoi akademii Respubliki Belarus'* [Bulletin of the Military Academy of the Republic of Belarus], 2017, no. 3, pp. 80–86 (in Russian).
2. Golubev A. N., Lapin A. A. Mathematical model of a synchronous motor with a polyphase stator winding. *Elektrotehnika = Electrical Engineering*, 1998, no. 9, pp. 8–13 (in Russian).
3. Barrero F. F., Prieto J., Levi E., Gregor R., Toral S., Duran M. J., Jones M. An enhanced predictive current control method for asymmetrical six-phase motor drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, vol. 58, no. 8, pp. 3242–3252. <https://doi.org/10.1109/tie.2010.2089943>
4. Duran M. J., Riveros J., Barrero F., Guzmán H., Prieto J. Reduction of common-mode voltage in five-phase induction motor drives using predictive control techniques. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2012, vol. 48, no. 6, pp. 2059–2067. <https://doi.org/10.1109/tia.2012.2226221>
5. Panteleev S. V., Malashin A. N. Mathematical model of a multiphase magnetolectric generator with fractional tooth windings. *Magisterskii vestnik: sbornik nauchnykh trudov magistrantov i aspirantov* [Master's Bulletin: Collection of Scientific Works of Undergraduates and Postgraduates]. Minsk, 2017, pp. 51–58 (in Russian).

6. Golubev A. N. *Multiphase Asynchronous Variable Electric Drive for Highly Dynamic Systems of Mobile Plants*. Saint Petersburg, Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”, 1994. 430 sheets (in Russian).
7. Lopatin P. N. *Multiphase Asynchronous Electric Drive for Autonomous Systems*. Ivanovo, Ivanovo Power Engineering Institute, 1998. 278 sheets.
8. Jones M., Vukosavic S. N., Dujic D., Levi E. A synchronous current control scheme for multiphase induction motor drives. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2009, vol. 24, no. 4, pp. 860–868. <https://doi.org/10.1109/tec.2009.2025419>
9. Che H. S., Levi E., Jones M., Hew W. P., Rahim N. A. Current control methods for an asymmetrical six-phase induction motor drive. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, vol. 29, no. 1, pp. 407–417. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2248170>
10. Hu Y., Zhu Z., Liu K. Current control for dual three-phase permanent magnet synchronous motors accounting for current unbalance and harmonics. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2014, vol. 2, no. 2, pp. 272–284. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2014.2299240>
11. Khan M. R., Iqbal A., Ahmad M. MRAS-based sensorless control of a vector controlled five-phase induction motor drive. *Electric Power System Research*, 2008, vol. 78, pp. 1311–1321. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2007.11.006>
12. White D. C., Woodson H. H. *Electromechanical Energy Conversion*. New York, John Wiley and Sons, 1959. – 520 p.
13. Fortescue C. L. Method of symmetrical coordinates applied to the solution of polyphase networks. *AIEE Transactions*, 1918, vol. 37, part 2, pp. 1027–1140. <https://doi.org/10.1109/t-aiee.1918.4765570>
14. Efimov A. A., Shreiner R. T. *Active Converters in Variable AC Drives*. Novouralsk, Novouralsk State Technological Institute Publ., 2001. 250 p. (in Russian).
15. Shreiner R. T., Efimov A. A., Kalygin A. I. Mathematical description and PWM algorithms of active current rectifiers. *Elektrotehnika = Electrical Engineering*, 2000, no. 10, pp. 42–49 (in Russian).
16. Volkov A. V. Analysis of electromagnetic processes and improvement of active filter regulation. *Elektrotehnika = Electrical Engineering*, 2002, no. 12, pp. 40–48 (in Russian).
17. Pantelev S. V., Malashin A. N., Kaleda A. E. Simulation of m -phase active voltage rectifier with spacevector modulation. *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. 4, pp. 455–468 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-4-455-468>

Информация об авторах

Пантелеев Станислав Владимирович – преподаватель кафедры электротехники и систем электропитания, Военная академия Республики Беларусь (пр. Независимости, 220, 220057, Минск, Республика Беларусь). E-mail: pantelev-s-v@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).

Каледка Евгенийевич – кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры электротехники и систем электропитания, Военная академия Республики Беларусь (пр. Независимости, 220, 220057, Минск, Республика Беларусь).

Information about the authors

Stanislav V. Pantelev – Teacher of the Chair of Electrical Equipment and Power Supply Systems, Military Academy of the Republic of Belarus (220, Nezavisimosti Ave., 220057, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pantelev-s-v@mail.ru

Andrey N. Malashin – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor, Professor of the Chair of Electrical Equipment and Power Supply Systems, Military Academy of the Republic of Belarus (220, Nezavisimosti Ave., 220057, Minsk, Republic of Belarus).

Andrey E. Kaleda – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor, Head of the Chair of Electrical Equipment and Power Supply Systems, Military Academy of the Republic of Belarus (220, Nezavisimosti Ave., 220057, Minsk, Republic of Belarus).

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

УДК 662.711.4

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-341-348>

Поступила в редакцию 11.03.2020

Received 11.03.2020

С. В. Василевич¹, М. В. Малько², Д. В. Дегтеров², А. Н. Асадчий²¹*Белорусская государственная академия авиации, Минск, Республика Беларусь*²*Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь***ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ НА ОБРАЗОВАНИЕ ДРЕВЕСНОГО УГЛЯ
В ПРОЦЕССЕ ПИРОЛИЗА РАСТИТЕЛЬНОЙ БИОМАССЫ**

Аннотация. Приводятся результаты экспериментального исследования влияния давления на образование древесного угля в процессе пиролиза древесины, осуществленного на лабораторном стенде при давлениях 1, 3, 5, 7 атм и температуре 400 °С. В качестве исходного сырья использована березовая древесина в виде щепы размером частиц 17×8×6 мм. Влажность сырья составляла 14,2 мас.%, плотность – 506,4 кг/м³, зольность – 0,23 мас.%. Установлено, что повышение давления от 1 до 7 атм приводит к увеличению выхода древесного угля от ~ 25 мас.% до ~ 32 мас.%. Содержание углерода при этом возрастает от 89,1 до 96,4 мас.%. Также экспериментально исследовано влияние искусственного ухудшения условий выхода летучих компонентов парогазовой смеси из реакционной зоны на образование древесного угля и содержание углерода. Полученные данные позволяют предположить, что ухудшение условия выхода из реакционной зоны летучих компонентов приводит к их разложению с образованием углерода, отлагающегося в порах пиролизуемого материала и на его внешней поверхности. Представлены экспериментальные данные, свидетельствующие о том, что компоненты пиролизной смолы разлагаются в присутствии древесного угля с отложением образующегося углерода на его поверхности. На протекание этого процесса указывает различие в массах одинаковых образцов древесного угля, выдерживаемых при температуре 600 °С при отсутствии и наличии пиролизной смолы: конечная масса образца, выдерживаемого в присутствии пиролизной смолы, превышает массу образца, выдерживаемого при ее отсутствии. Эти результаты дают косвенное доказательство правильности предположения о разложении компонентов пиролизной смолы в порах и на поверхности пиролизуемого материала при задержке выхода продуктов пиролиза из реакционной зоны. Результаты настоящего исследования представляют интерес для специалистов, разрабатывающих пиролизное оборудование.

Ключевые слова: пиролиз, давление, древесный уголь, содержание углерода, вторичные процессы

Для цитирования: Влияние давления газовой среды на образование древесного угля в процессе пиролиза растительной биомассы / С. В. Василевич [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, №3. – С. 341–348. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-341-348>

Siarhei V. Vasilevich¹, Mikhail V. Malko², Dmitry V. Degterov², Andrei N. Asadchyi²¹*Belarusian State Academy of Aviation, Minsk, Republic of Belarus*²*Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***INFLUENCE OF GASES PRESSURE ON THE FORMATION OF CHARCOAL IN THE PROCESS
OF PYROLYSIS OF PLANT BIOMASS**

Abstract. The article discusses the results of an experimental study of the effect of pressure on the formation of charcoal during the pyrolysis of wood, carried out on a laboratory bench at pressures of 1, 3, 5, 7 atm and a temperature of 400 °C. Birch wood in the form of wood chips with a particle size of 17×8×6 mm was used as feedstock. Its moisture content was 14.2 % by weight, its density was 506.4 kg/m³, and its ash content was 0.23 % by weight. It was found that an increase in pressure from 1 atm to 7 atm leads to an increase in the yield of charcoal from about 25 % weight. up to about 32 % weight. The carbon content in this case increases from 89.1 % by weight to 96.4 % by weight. The work also experimentally investigated the effect of artificial deterioration of the conditions for the exit of volatile pyrolysis components from the reaction zone on the formation of charcoal and carbon content. The data obtained suggest that the deterioration of the exit conditions of volatile components from the reaction zone leads to their decomposition with the formation of carbon deposited in the pores of the pyrolyzable material and on its outer surface. Experimental data are also presented showing that components of the pyrolysis tar decompose in the presence of charcoal with the deposition of the formed carbon on its surface. The presence of such process is indicated by the difference in masses of identical charcoal samples studied at a temperature of 600 °C in the absence and presence of pyrolysis tar. The final mass of the sample, investigated in the presence of pyrolysis resin, as established in the work, exceeds the mass of the sample, studied in its absence. These results provide indirect evidence of the correctness of the assumption about the decomposition of the pyrolysis components in the pores and on the surface of the pyrolyzable material by a delay in the release of the pyrolysis components from the reaction zone. The results of this study are of interest to specialists developing pyrolysis equipment.

Keywords: pyrolysis, pressure, charcoal, carbon content, secondary processes

For citation: Vasilevich S. V., Malko M. V., Degterov D. V., Asadchyi A. N. Influence of gases pressure on the formation of charcoal in the process of pyrolysis of plant biomass. *Vesti Natsyonal'noi akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 3, pp. 341–348 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-341-348>

Введение. Экспериментальное исследование влияния различных параметров на образование древесного угля в процессе пиролиза древесины является важным этапом на пути разработки эффективной технологии получения этого важного продукта, который широко используется в различных секторах народного хозяйства. Давление, при котором осуществляется пиролиз биомассы, относится к числу важнейших параметров, влияющих на качество и выход древесного угля в процессе термохимической конверсии биомассы.

При изучении пиролиза целлюлозы и древесной биомассы при температуре 400 °С было установлено, что образование древесного угля обусловлено протеканием первичных и вторичных химических процессов [1, 2]. В результате протекания первичных процессов происходит образование древесного угля и большого количества различных углеводородов, которые затем разлагаются с образованием древесного угля и летучих компонентов CO₂, CO, H₂ и др. С ростом давления, при котором происходит пиролиз, выход древесного угля повышается. Результаты работ [1, 2] позднее были подтверждены в исследованиях пиролиза различных типов биомассы при различных условиях осуществления этого процесса [3–5].

Физические и химические процессы, оказывающие влияние на образование древесного угля в процессе пиролиза древесной биомассы, не выяснены до настоящего времени. Возможной причиной положительного влияния давления на выход древесного угля может быть разложение компонентов пиролизной смолы внутри пор образующегося угля. Разумно предположить, что диффузионный выход этих компонентов из пор замедляется с ростом давления, при котором осуществляется пиролиз. Это должно приводить к повышению доли первичных продуктов пиролиза, разлагающихся внутри пор, и, следовательно, к повышению образования массы древесного угля.

К увеличению выхода древесного угля с ростом давления в зоне пиролиза, очевидно, могут приводить и затруднения в диффузионном выходе продуктов пиролиза из реакционной зоны.

Отмеченные обстоятельства указывают на важность проведения дополнительных исследований влияния давления на повышение выхода древесного угля и содержания углерода в нем с целью уточнения условия возникновения этих эффектов. Целью экспериментального исследования пиролиза древесной биомассы, описанного в настоящей работе, явилось углубление понимания этих эффектов давления. Предварительные результаты исследования влияния давления на процесс термохимической конверсии биомассы, выполненного в Институте энергетики Национальной академии наук Беларуси, описаны в работе [6].

Методы и результаты исследования. Исследования пиролиза биомассы проводились на стенде, основным элементом которого является лабораторный реактор, описанный в работе [6].

Основные результаты были получены при давлениях 0,1, 0,3, 0,5, 0,7 МПа и температуре 400 °С.

В каждом эксперименте исследование проводилось по следующей методике. Примерно 4 кг исходного материала загружались в реактор, после чего включался электрический нагреватель, работающий на постоянной мощности, которая контролировалась на основе непрерывных замеров силы и напряжения подводимого электрического тока.

В качестве исходного сырья использована березовая древесина в виде щепы размером частиц 17×8×6 мм. Влажность исходной древесины составляла 14,2 мас.%, плотность – 506,4 кг/м³, зольность – 0,23 мас.%.

Влажность древесины определялась с помощью влагомера ФАУНА-М (изготовитель ООО «Лента», РФ).

Более подробно методика проведения экспериментов (температура нагрева, время выдержки при постоянных условиях, начальная газовая атмосфера и т.д.) приведена в работе [6].

В результате выполненных исследований было установлено, что с ростом давления, при котором осуществлялся пиролиз, происходило увеличение выхода древесного угля, а также

увеличение содержания углерода в образовавшемся угле. Так, по данным опытов, в диапазоне давлений 1–7 атм выход древесного угля по отношению к сухой исходной биомассе изменялся от 25 до 29,4 мас.%, а содержание углерода увеличивалось от 89,1 до 96,4 мас.% (таблица).

Элементный состав древесного угля определялся методом рентгеноспектрального микроанализа с помощью энергодисперсионного анализатора Oxford Instruments X-MaxN, работающего совместно с растровым электронным микроскопом LEO1455VP с чувствительностью 0,1 ат.%. Данное оборудование не позволяет распознавать водород, поэтому в таблице отсутствует информация о содержании данного химического элемента в образцах древесного угля. В то же время таблица содержит данные по компонентам Si, Al, Ca, K, Mg, Mn, P, Fe, которые изменяются случайным образом в связи с разбросом содержаний этих элементов в исходном сырье. Содержание серы и азота в сырой древесине и древесном угле не было зафиксировано.

Как уже отмечалось, увеличение выхода углерода с ростом давления, при котором происходит пиролиз древесной биомассы, возможно, обусловлено замедлением диффузионного выхода компонентов, образовавшихся в порах в процессе разложения древесной массы и диффузионного выхода таких компонентов из реакционной зоны.

С целью проверки этой гипотезы в настоящей работе были выполнены эксперименты с установлением искусственной преграды для затруднения диффузионного выхода компонентов парогазовой смеси из пор образующегося древесного угля и реакционной зоны. Для проведения таких экспериментов была изготовлена керамическая емкость, схема и общий вид которой представлен на рис. 1.

Емкость представляет собой два керамических тигля (наружный 1 и внутренний 2), между которыми находится опорная часть. Диаметр наружного тигля составлял 75 мм, диаметр внутреннего тигля – 50 мм. В дне внутреннего тигля просверливается отверстие диаметром

Элементный состав образцов древесного угля, полученного при различных давлениях
Elemental composition of raw materials and charcoal obtained at different pressures

Элемент	Сырая древесина, %	Уголь, полученный при давлении, %			
		1 атм	3 атм	5 атм	7 атм
C	54,9	89,1	94,02	95,3	96,4
O	44,8	8,4	5,66	4,0	2,9
Si	0,2	0,2	0,01	0,1	–
Al	0,1	–	0,03	–	–
Ca	–	1,3	0,10	0,4	0,3
K	–	0,3	0,03	0,1	0,2
Mg	–	0,2	0,03	–	0,1
Mn	–	0,2	0,05	–	–
P	–	0,1	0,02	–	–
Fe	–	–	0,04	–	–
S	–	–	–	–	–
N	–	–	–	–	–

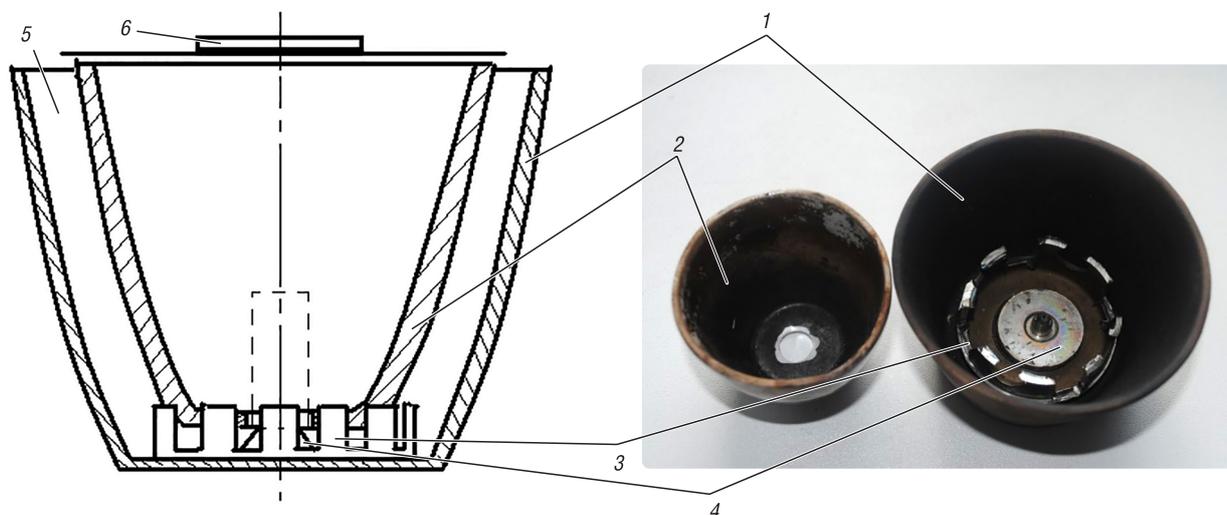


Рис. 1. Керамическая емкость для изучения условий выхода продуктов первичных процессов пиролиза
Fig. 1. Ceramic container for studying output conditions of products of the primary pyrolysis



Рис. 2. Расположение древесной частицы в тигле
Fig. 2. Location of the wood particle in the crucible

11 мм. Опорная часть состоит из опорного кольца 3 с отверстиями и шипа 4. Также в комплект емкости входит сетка 5 из нержавеющей стали и круглые асбестовые пластины 6 разного диаметра (25 мм, 35 мм, 43 мм, 45 мм) для частичного перекрытия верхней части тиглей.

В качестве исследуемых пиролизуемых образцов использовались древесные цилиндры диаметром 10 мм и длиной 25 мм (порода дуб, влажность 7,4 %, зольность 0,18 %). Была подготовлена серия таких древесных цилиндров, каждый из которых подвергался термической конверсии в течение определенного времени (3, 5, 6, 9, 12, 15, 20 мин).

Древесные цилиндры предварительно взвешивали и вставляли вертикально в отверстие внутреннего тигля, который опирался нижним торцом о шип (рис. 2).

Перед каждым экспериментом тигли заполняли углекислым газом для вытеснения воздуха. Сверху тигли накрывали сеткой, на которую помещали асбестовую пластину. После этого емкость помещали в разогретую муфельную печь на определенное время. Все опыты производились при температуре в муфельной печи равной 600 °С. Образцы выдерживались в муфельной печи в течение определенного времени. При этом происходило термическое разложение (пиролиз) древесной частицы и изменение его цвета от светло-коричневого при выдержке на протяжении нескольких минут до темного цвета при выдержке на протяжении 20 мин.

Основная часть газообразных продуктов пиролиза, в состав которых входят углеводороды и другие компоненты, выходила через торцы древесного цилиндра. В случае отсутствия частичного перекрытия газообразные продукты пиролиза быстро выходили из тиглей. При частичном перекрытии газообразные продукты задерживались как в пиролизуемом образце, так и во внутреннем тигле.

На рис. 3 представлен внешний вид древесных образцов после их выдерживания в муфельной печи на протяжении от нескольких минут до 20 мин.



Рис. 3. Внешний вид древесных образцов после их термической обработки
Fig. 3. Appearance of wood samples after their heat treatment

После проведения экспериментов устанавливались значения относительной массы каждого исследованного образца (отношение массы после термического разложения к начальной массе образца). Такие данные определялись для различной степени перекрытия внутреннего тигля, которая рассчитывалась как отношение квадрата диаметра асбестовой пластины перекрытия к квадрату диаметра внутреннего тигля.

На рис. 4 представлена зависимость выхода древесного угля от относительного перекрытия внутреннего тигля. Видно, что увеличение массы образца линейно зависит от степени перекрытия

тия внутреннего тигля. Практически аналогичные результаты были получены авторами работы [4]. Это подтверждает гипотезу о том, что роль повышенного давления, при котором происходит пиролиз биомассы, заключается в увеличении доли разложения первичных продуктов пиролиза во вторичных химических реакциях в результате затруднения выхода их из пор пиролизуемого вещества, а также из зоны, примыкающей к пиролизуемому образцу. Возможно, это разложение является гетерогенным процессом разложения продуктов пиролиза биомассы на стенках образовавшихся пор или комбинацией гетерогенного и гомогенного процессов как внутри пор, так и на внешней поверхности пиролизуемого материала, что и приводит к росту выхода древесного угля.

Точки на рис. 4. представляют экспериментальные величины, а сплошная линия – расчет по аппроксимационному выражению

$$Y = 0,45004 \cdot X + 21,50293; R^2 = 0,9687; p = 0,0066,$$

где Y – выход угля, мас.%; R^2 – константа детерминации; p – степень достоверности.

Как следует из приведенных данных, зависимость выхода угля от степени перекрытия области тигля имеет статистически достоверный характер.

Представленные данные экспериментов могут быть интерпретированы и как результат более существенного оседания смол на образце угля. В этом случае масса образца будет больше при увеличении относительного перекрытия (так как смолы дольше находятся в прилегающей к образцу области), однако процентное содержание углерода в образце должно снижаться.

Для получения результатов, указывающих на то, какой из двух перечисленных процессов оказывает влияние на наблюдаемое увеличение выхода древесного угля и содержания углерода, нами выполнено экспериментальное исследование с использованием готового древесного угля и пиролизной смолы.

В этом эксперименте использовался образец березового древесного угля массой 2,7 г и пиролизная смола (жидкие углеводороды), полученные предварительно путем термохимической конверсии березовой древесины при температуре 600 °С.

Пиролиз березовой древесины осуществлялся при атмосферном давлении и температуре 600 °С при ее прогреве в течение 10 ч. По окончании пиролиза был выполнен элементный анализ для определения процентного содержания углерода в данном образце. Оно составило 84,51 %. На рис. 5 приведены микрофотография образца и участок рабочего окна хроматографа.

Экспериментальное исследование влияния пиролизной смолы на выход древесного угля в процессе термохимической конверсии проводили следующим способом. Образец угля был разделен на два равных куса примерно по 1,3 г каждый. Образцы подвергали

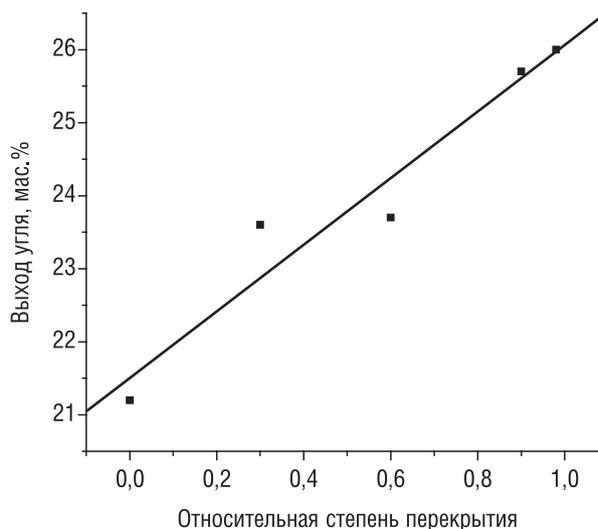
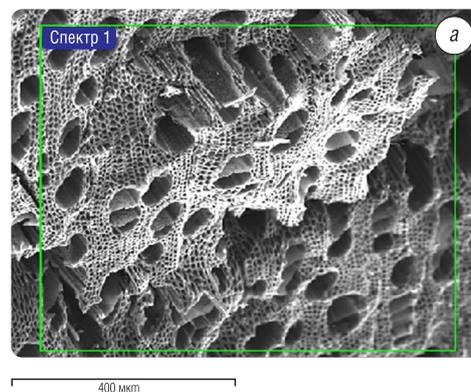


Рис. 4. Массовый выход твердого остатка в зависимости от степени перекрытия внутреннего тигля

Fig. 4. Mass yield of solid residue depending on the degree of overlap of the inner crucible



Общий результат:

Элемент	Весовой %	Атомный%
С	80.02 +/- 0.39	84.51
О	19.23 +/- 0.39	15.25
К	0.44 +/- 0.04	0.14
Са	0.31 +/- 0.04	0.10
Итого	100.00	100.00

Рис. 5. Микрофотография образца угля (a) и рабочее окно хроматографа (b)

Fig. 5. Micrograph of a coal sample (a) and the working window of a chromatograph (b)

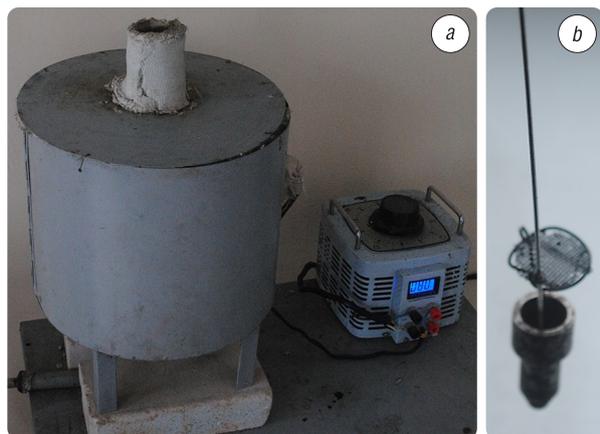


Рис. 6. Общий вид экспериментального высокотемпературного стенда (а), штока для образца угля и емкости с пиролизной смолой (b)

Fig. 6. General view of the experimental high-temperature stand (a), rod for a coal sample and a container with pyrolysis tar (b)

термической обработке. Для этого использовался экспериментальный высокотемпературный стенд, который представляет собой реактор, оснащенный электрическим нагревателем, позволяющим установить температурный режим в реакторе до 1000 °С (рис. 6, а), а также шток для закрепления на него образца угля и емкости с пиролизной смолой (рис. 6, b).

Предварительно реактор заполняли углекислым газом (для вытеснения воздуха) и выводили на необходимый температурный режим (600 °С). После этого один образец угля закрепляли на штоке и устанавливали внутри реактора в положении, указанном на рис. 6, b. Образец угля выдерживался при температуре 600 °С в реакторе в течение 20 мин. После этого образец извлекали, взвешивали и определяли содержание углерода в нем. Содержание углерода составило 94,33 %. На рис. 7 приведены микрофотография образца после выдержки и участок рабочего окна хроматографа.

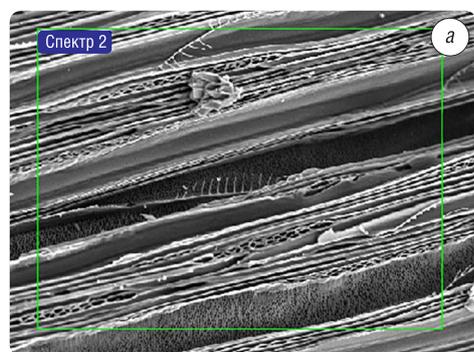
Масса образца угля после выдержки составила 1,07 г при исходной массе в 1,3 г. Потеря массы составила 17,4 %, а процентное содержание углерода увеличилось на 9,82 %. Приведенные результаты можно объяснить разложением остаточных углеводородных соединений, находящихся в порах угля.

Затем второй образец угля помещали на шток. Емкость, находящаяся под образцом древесного угля, заполнялась пиролизной жидкостью. Шток опускали в реактор, предварительно наполненный углекислым газом. Пиролизная жидкость испарялась, вытесняя углекислый газ из реактора. При этом концентрация углеводородов в непосредственной близости к образцу угля становилась значительно выше, чем в предыдущем эксперименте.

Этот образец угля выдерживался на протяжении 20 мин также при температуре 600 °С. После этого образец извлекали, взвешивали и определяли содержание углерода в нем, составившее по данным измерения 96,81 %. На рис. 8 приведены микрофотография образца после выдержки и участок рабочего окна хроматографа.

Масса образца угля после выдержки составила 1,33 г, что на 2,3 % превышает исходную массу. Процентное содержание углерода увеличилось на 12,3 %, что выше, нежели в случае образца, изученного без использования смолы.

Из результатов проведенных авторами настоящей статьи экспериментов следует, что при высокой концентрации углеводородов, составляющих пиролизную смолу, в реакционной зоне, выход твердых продуктов и процентное содержание углерода выше, нежели в случае низкой концентрации таких углеводородов. Это подтверждает факт влияния вторичных реакций на массовый выход твердых продуктов пиролиза и является



Общий результат:

Элемент	Весовой %	Атомный%
С	92.38 +/- 0.43	94.33
О	7.25 +/- 0.42	5.56
К	0.23 +/- 0.03	0.07
Са	0.14 +/- 0.03	0.04
Итого	100.00	100.00

Рис. 7. Микрофотография образца после выдержки без смолы (а) и рабочее окно хроматографа (b)

Fig. 7. Micrograph of the sample after exposure without tar (a) and the working window of the chromatograph (b)

свидетельством того, что основная роль давления в области низкотемпературного пиролиза биомассы заключается в увеличении длительности протекания вторичных реакций, что обусловлено ухудшением условий выхода компонентов, образовавшихся в первичных процессах, из пористой матрицы и зоны, примыкающей к пиролизуемому материалу.

Заключение. В работе приведено обсуждение результатов экспериментальных исследований пиролиза древесной массы при температуре 400 °С и давлениях от 1 до 7 атм. Установлено, что повышение давления в этом интервале приводит к увеличению выхода древесного угля от примерно 25 до ~32 мас.%. Содержание углерода при этом возрастает от 89,1 до 96,4 мас.%.

С использованием искусственного перекрытия реакционной зоны изучено влияние ухудшения условий выхода образовавшихся летучих компонентов из реакционной зоны на образование древесного угля. Показано, что при увеличении перекрытия реакционной зоны массовый выход твердого остатка увеличивается.

Экспериментальным путем доказано, что повышенная концентрация углеводородов в непосредственной близости к пиролизуемой частице приводит к увеличению выхода твердых продуктов и процентного содержания углерода. Это является свидетельством того, что основная роль давления в области низкотемпературного пиролиза биомассы заключается в ухудшении условий выхода компонентов, образовавшихся в первичных процессах из пористой матрицы и зоны, примыкающей к пиролизуемому материалу.

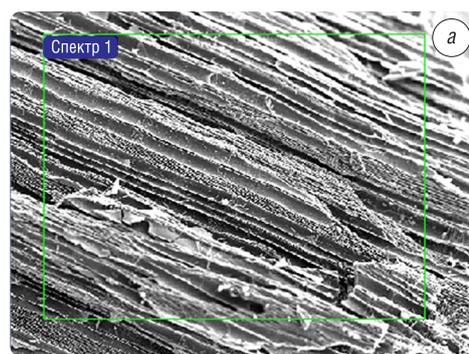
Результаты настоящего исследования представляют интерес для специалистов, разрабатывающих пиролизное оборудование.

Список использованных источников

1. Klason, P. Untersuchungen zur Holzverkohlung. I. Die trockene Distillation der Cellulose / P. Klason, G. Heidenstam, E. Norlin // *Z. Angew. Chem.* – 1909. – Bd. 25. – S. 1205–1214. <https://doi.org/10.1002/ange.19090222503>
2. Klason, P. Untersuchungen zur Holzverkohlung. II. Die trockene Distillation des Holzes von Kiefer, Fichte, Birke und Buche / P. Klason, G. Heidenstam, E. Norlin // *Z. Angew. Chem.* – 1910. – Bd. 26. – S. 1252–1254. <https://doi.org/10.1002/ange.19100232702>
3. Mok, W. S.-L. Effects of pressure on biomass pyrolysis. I. Cellulose pyrolysis products / W. S.-L. Mok, M. J. Antal, Jr. // *Thermochimica Acta.* – 1983. – Vol. 68, № 2–3. – P. 155–164. [https://doi.org/10.1016/0040-6031\(83\)80221-4](https://doi.org/10.1016/0040-6031(83)80221-4)
4. Is Elevated Pressure Required to Achieve a High Fixed-Carbon Yield of Charcoal from Biomass? Part 1: Round-Robin Results for Three Different Corn cob Materials / L. Wang [et al.] // *Energy Fuels.* – 2011. – Vol. 25, № 7. – P. 3251–3265. <https://doi.org/10.1021/ef200450h>
5. Basile, L. The Role of Pressure in the heat of Pyrolysis of a Lignocellulosic Biomass / L. Basile, A. Tugnoli, V. Cozzani // *Chem. Eng. Trans.* – 2015. – Vol. 43. – P. 451–456. <https://doi.org/10.3303/CET1543076>
6. Исследование процесса получения древесного угля путем пиролиза под давлением / С. В. Василевич [и др.] // *Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук.* – 2017. – № 3. – С. 64–71.

Reference

1. Klason P., Heidenstam G., Norlin E. Untersuchungen zur Holzverkohlung. I. Die trockene Distillation der Cellulose. *Zeitschrift für Angewandte Chemie*, 1909, Bd. 25, S. 1205–1214 (in German). <https://doi.org/10.1002/ange.19090222503>
2. Klason P., Heidenstam G., Norlin E. Untersuchungen zur Holzverkohlung. II. Die trockene Distillation des Holzes von Kiefer, Fichte, Birke und Buche. *Zeitschrift für Angewandte Chemie*, 1910, Bd. 26, S. 1252–1254 (in German). <https://doi.org/10.1002/ange.19100232702>



Общий результат:

Элемент	Весовой %	Атомный%
С	95.70 +/- 0.49	96.81
О	4.13 +/- 0.49	3.13
К	0.18 +/- 0.04	0.05
Итого	100.00	100.00

Рис. 8. Микрофотография образца после выдержки в присутствии смолы (а) и рабочее окно хроматографа (б)

Fig. 8. Micrograph of the sample after exposure in the presence of tar (a) and the working window of the chromatograph (b)

3. Mok W. S.-L., Antal M. J., Jr. Effects of pressure on biomass pyrolysis. I. Cellulose pyrolysis products. *Thermochimica Acta*, 1983, vol. 68, no. 2–3, pp. 155–164. [https://doi.org/10.1016/0040-6031\(83\)80221-4](https://doi.org/10.1016/0040-6031(83)80221-4)
4. Wang L., Trninic M., Skreiberg Ø., Gronli M., Considine R., Antal M. J., Jr. Is Elevated Pressure Required To Achieve a High Fixed-Carbon Yield of Charcoal from Biomass? Part 1: Round-Robin Results for Three Different Corn cob Materials. *Energy and Fuels*, 2011, vol. 25, no. 7, pp. 3251–3265. <https://doi.org/10.1021/ef200450h>
5. Basile L., Tugnoli A., Cozzani V. The Role of Pressure in the heat of Pyrolysis of a Lignocellulosic Biomass. *Chemical Engineering Transactions*, 2015, vol. 43, pp. 451–456. <https://doi.org/10.3303/CET1543076>
6. Vasilevich S. V., Malko M. V., Bohach V. N., Degterov D. V., Asdchyi A. N. Study of the process of charcoal producing by pyrolysis under pressure. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2017, no. 2, pp. 64–71 (in Russian).

Информация об авторах

Василевич Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой, Белорусская государственная академия авиации (ул. Уборевича, 77, 220096, Минск, Республика Беларусь). E-mail: svasilevich@yandex.ru

Малько Михаил Владимирович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 15, корп. 2, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: mikhailvm@bas-net.by

Дегтеров Дмитрий Валентинович – старший научный сотрудник, Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 15, корп. 2, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ddegterov@mail.ru

Асадчий Андрей Николаевич – старший научный сотрудник, Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 15, корп. 2, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: asadchyi@tut.by

Information about the authors

Siarhei V. Vasilevich – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department, Belarusian State Academy of Aviation (77, Uborevich Str., 220096, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: svasilevich@yandex.ru

Mikhail V. Malko – Ph. D. (Physic and Mathematic), Leading Researcher, Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (15, building 2, Academicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mikhailvm@bas-net.by

Dmitry V. Degterov – Senior Researcher, Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (15, building 2, Academicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ddegterov@mail.ru

Andrei N. Asadchyi – Senior Researcher, Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (15, building 2, Academicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: asadchyi@tut.by

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
RADIOELECTRONICS AND INSTRUMENT-MAKINGУДК 621.383.92
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-349-356>Поступила в редакцию 11.05.2020
Received 11.05.2020**М. А. Асаёнок¹, А. О. Зеневиц¹, О. В. Кочергина¹, Е. В. Новиков¹, С. А. Сорока²**¹Белорусская государственная академия связи, Минск, Республика Беларусь,
²ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск, Республика Беларусь**РАБОТА КРЕМНИЕВЫХ ФОТОЭЛЕКТРОННЫХ УМНОЖИТЕЛЕЙ СО СТРУКТУРОЙ**
 $p^+ - p - n^+$ В РЕЖИМЕ ОДНОКВАНТОВОЙ РЕГИСТРАЦИИ

Аннотация. Изучены условия реализации режима одноквантовой регистрации для кремниевых фотоэлектронных умножителей со структурой $p^+ - p - n^+$ и получены данные об их характеристиках в этом режиме. Приведены структура экспериментальной установки и методика исследований. Выполнены измерения счетных характеристик фотоприемников, таких как зависимости скорости счета однофотонных импульсов, скорости темновых импульсов и отношения сигнал/шум. Представлены зависимости скорости счета однофотонных импульсов от интенсивности оптического излучения, регистрируемого кремниевым фотоэлектронным умножителем. Установлено, что данные зависимости имеют линейный участок, длина которого увеличивается с ростом перенапряжения кремниевых фотоэлектронных умножителей. Также с ростом перенапряжения увеличивается угол наклона линейного участка. Приведены зависимости скорости счета однофотонных и темновых импульсов, а также отношения сигнал/шум от перенапряжения. Получено, что скорость счета темновых импульсов возрастает с увеличением перенапряжения. Установлено, что зависимость отношения сигнал/шум от перенапряжения для этих кремниевых фотоэлектронных умножителей имеет максимум. Для получения максимальной чувствительности исследованных кремниевых фотоэлектронных умножителей необходимо выбирать перенапряжение, соответствующее этому максимуму. В результате сравнения чувствительности исследуемых кремниевых фотоэлектронных умножителей и лавинных фотодиодов установлено, что кремниевые фотоэлектронные умножители, работающие в режиме одноквантовой регистрации, имеют более высокую чувствительность по сравнению с лавинными фотодиодами в этом же режиме работы. С уменьшением температуры данное превосходство сохраняется. Также понижение температуры приводит к уменьшению минимального значения интенсивности регистрируемого оптического излучения. Тем самым доказана возможность работы кремниевых фотоэлектронных умножителей в режиме одноквантовой регистрации. Данные результаты могут применяться в системах квантовой криптографии при приеме оптического сигнала.

Ключевые слова: лавинный фотодиод, кремниевый фотоэлектронный умножитель, режим одноквантовой регистрации, скорость счета однофотонных импульсов, скорость счета темновых импульсов, отношение сигнал/шум, чувствительность

Для цитирования: Работа кремниевых фотоэлектронных умножителей со структурой $p^+ - p - n^+$ в режиме одноквантовой регистрации / М. А. Асаёнок [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, №3. – С. 349–356. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-349-356>

Maryna A. Asayonak¹, Andrey O. Zenevich¹, Volha V. Kacharhina¹, Yauhen V. Novikau¹, Syargey A. Saroka²¹Belarusian State Academy of Communications, Minsk, Republic of Belarus²State Scientific and Practical Association "Optics, Optoelectronics and Laser Technology", Minsk, Republic of Belarus**OPERATION OF SILICON PHOTOELECTRONIC MULTIPLIERS WITH THE STRUCTURE $p^+ - p - n^+$**
IN THE SINGLE QUANTUM REGISTRATION MODE

Abstract. The conditions for realizing the single-quantum detection mode for silicon photomultiplier tubes with the $p^+ - p - n^+$ structure are studied and data on their characteristics in this mode are obtained. The structure of the experimental setup and the research technique are presented. Measurements of the counting characteristics of the photodetectors, such as the dependences of the counting rate of single-photon pulses, the speed of dark pulses, and the signal-to-noise ratio, have been

performed. The dependences of the counting rate of one-photon pulses on the intensity of optical radiation recorded by a silicon photomultiplier tube are presented. It was found that these dependences had a linear section, the length of which increased with increasing overvoltage of silicon photomultiplier tubes. Also, with an increase in overvoltage, the angle of inclination of the linear section increased. The dependences of the count rate of one-photon and dark pulses, as well as the signal-to-noise ratio on overvoltage, are given. It was found that the counting rate of dark pulses increased with increasing overvoltage. It was found that the dependence of the signal-to-noise ratio on the overvoltage for these silicon photomultiplier tubes has a maximum. To obtain the maximum sensitivity of the studied silicon photomultiplier tubes, it is necessary to select the overvoltage corresponding to this maximum. As a result of comparing the sensitivity of the investigated silicon photomultiplier tubes and avalanche photodiodes, it was found that silicon photomultiplier tubes operating in the single-quantum detection mode have a higher sensitivity compared to avalanche photodiodes in the same operating mode. With a decrease in temperature, this superiority persisted. Also, a decrease in temperature led to a decrease in the minimum value of the intensity of the recorded optical radiation. Thus, the possibility of operation of silicon photomultiplier tubes in the single-quantum registration mode has been proved. These results can be applied in quantum cryptography systems when receiving an optical signal.

Keywords: avalanche photodiode, silicon photoelectronic multiplier, single-quantum registration mode, count rate of single-photon pulses, count rate of dark pulses, signal-to-noise merit, sensitivity

For citation: Asayonak M. A., Zenevich A. O., Kacharhina V. V., Novikau Y. V., Saroka S. A. Operation of silicon photoelectronic multipliers with the structure p^+-p-n^+ in the single quantum registration mode. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 3, pp. 349–356 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-349-356>

Введение. В настоящее время фотоприемники, работающие в режиме одноквантовой регистрации, находят широкое применение в системах квантовой криптографии для приема информации, передаваемой отдельными фотонами. При этом под одноквантовым режимом работы понимается такой режим, при котором каждому фотону регистрируемого оптического излучения, который поступил на вход фотоприемника, соответствует один электрический импульс на его выходе.

В системах квантовой криптографии лавинные фотодиоды (ЛФД) используются в качестве приемников оптической информации [1, 2]. Однако ЛФД, работающие в режиме одноквантовой регистрации, неустойчивы к такому типу атак на квантовую систему, как «ослепление» фотоприемника [3]. Эта атака заключается в том, что несанкционированный пользователь полностью перехватывает данные, передаваемые однофотонными импульсами от одного санкционированного пользователя, а другому санкционированному пользователю от себя передает информацию многофотонными импульсами на фоне постоянного оптического излучения. Для ЛФД существует возможность подобрать длительность и амплитуду многофотонного импульса такими, чтобы санкционированным пользователем фотоотклик от этого импульса был воспринят как импульс, сформированный однофотонными импульсами санкционированного пользователя [4]. В связи с этим в квантовых криптографических системах целесообразно использовать фотоприемники, которые могли бы работать в режиме одноквантовой регистрации и обеспечивали устойчивость систем к атакам подобного вида. К таким фотоприемникам относятся кремниевые фотоэлектронные умножители Si-ФЭУ. Отметим, что амплитуда созданного однофотонным импульсом фотоотклика Si-ФЭУ в силу особенностей структуры этих умножителей всегда будет меньше амплитуды, сформированной оптическим импульсом, который содержит два и более фотона [5, 6].

Вместе с тем условия реализации режима одноквантовой регистрации для Si-ФЭУ и их характеристики в данном режиме работы в настоящий момент недостаточно изучены, что и обусловило *цель данной статьи*.

Экспериментальная установка и методика исследований. В качестве объекта исследований использовались опытные образцы Si-ФЭУ со структурой p^+-p-n^+ производства ОАО «Интеграл» (Республика Беларусь). Для проведения измерений из партии в 100 штук случайным образом были выбраны пять Si-ФЭУ.

Блок-схема экспериментальной установки, на которой выполнялись исследования, представлена на рис. 1. Установка функционирует следующим образом. Оптическое излучение постоянной интенсивности от полупроводникового лазера через набор калиброванных нейтральных светофильтров и полупрозрачное зеркало направляется на Si-ФЭУ. Для питания лазера используется источник питания P1. Изменяя коэффициент ослабления набора светофильтров, можно регулировать интенсивность оптического излучения. Полупрозрачное зеркало разделяет оптическое излучение таким образом, что 50 % интенсивности этого излучения поступает на Si-ФЭУ, а 50 % – на лазерный дозиметр ЛД-07, который обеспечивает контроль уровня интенсивности оптического излучения.

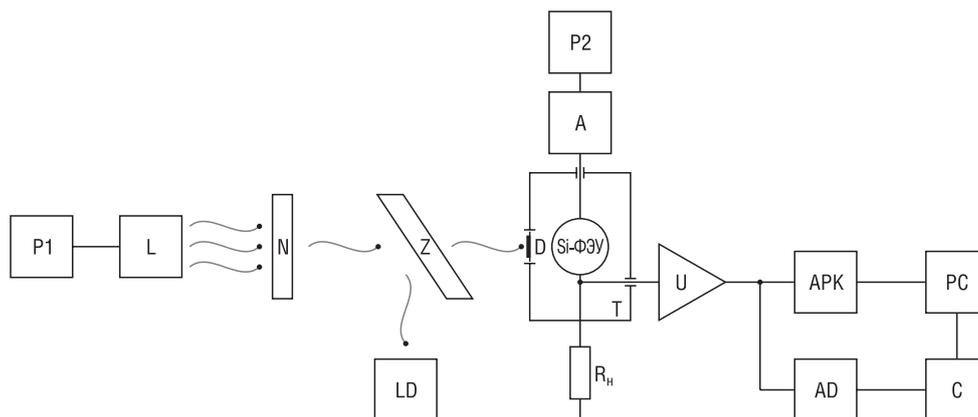


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки: P1 – источник питания, P2 – регулируемый источник питания, L – полупроводниковый лазер, N – набор нейтральных светофильтров, Z – полупрозрачное зеркало, LD – лазерный дозиметр, D – диафрагма, T – камера тепла и холода, A – амперметр, U – широкополосный усилитель, APK – аппаратно-программный комплекс, AD – амплитудный дискриминатор, PC – компьютер, C – частотомер, R_н – резистор нагрузки

Fig. 1. Block diagram of the experimental installation: P1 – power source, P2 – regulated power source, L – semiconductor laser, N – set of neutral filters, Z – half-transmitting mirror, LD – laser dosimeter, D – diaphragm, T – heat and cold chamber, A – ammeter, U – broadband amplifier, APK – hardware and software complex, AD – amplitude discriminator, PC – personal computer, C – cymometer, R_н – load resistor

Si-ФЭУ располагается в камере тепла и холода, с помощью которой изменяется температура фотоприемника. Камера имеет специальное окно с диафрагмой, через которое оптическое излучение поступает на Si-ФЭУ. Диафрагма позволяет также полностью перекрыть оптическое излучение, поступающее на Si-ФЭУ.

Для реализации режима одноквантовой регистрации на Si-ФЭУ подавалось напряжение питания от регулируемого источника питания P2. Значение напряжения питания устанавливалось близким к напряжению пробоя умножителя.

Si-ФЭУ представляет собой фотоприемник на основе упорядоченного набора отдельных ячеек – *p-n*-переходов, выполненных на общей подложке, и при значениях напряжения питания, близких к напряжению пробоя, поведение каждой ячейки фотоприемника может рассматриваться как индивидуальное. Сигнал каждой ячейки является логическим и не зависит от числа первоначальных носителей заряда, вызвавших срабатывание ячейки. В случае одновременного срабатывания нескольких ячеек сигнал на выходе фотоприемника будет являться суммой сигналов от всех сработавших ячеек.

Срабатывание ячейки может произойти при поглощении фотона регистрируемого оптического излучения или в результате термогенерации в ней свободного носителя заряда. Импульсы, сформированные на выходе Si-ФЭУ при поглощении фотона только в одной ячейке, будем называть однофотонными. Импульсы тока, вызванные термогенерацией носителей заряда в его ячейках, обозначим как темновые.

Амплитуда напряжения на выходе Si-ФЭУ зависит от величины нагрузочного резистора R_н. Сопротивление нагрузочного резистора R_н = 1 кОм соответствовало минимальной величине, при которой возможно формирование однофотонных импульсов с амплитудой, превышающей уровень шума усилителя.

Импульсы напряжения с нагрузочного резистора R_н поступают на вход широкополосного импульсного усилителя U, где они усиливаются и поступают параллельно на входы аппаратно-программного комплекса APK и амплитудного дискриминатора AD. Аппаратно-программный комплекс позволяет измерять амплитуду и накапливать амплитудное распределение импульсов напряжения, поступающих с выхода усилителя, а также определять среднюю амплитуду импульсов и ее дисперсию.

Дискриминатор AD работает как дифференциальный, выделяя из потока импульсов усилителя лишь те, амплитуда которых находится между уровнями, заданными двумя порогами

амплитудной селекции. Нижний порог располагается на уровне собственных шумов усилителя. Положение верхнего порога подбиралось таким образом, чтобы он выделял только импульсы Si-ФЭУ, сформированные одним фотоном. Значение величины верхнего порога определялось на основе анализа амплитудного распределения импульсов, регистрируемого АРК.

На своем выходе дискриминатор формирует стандартизированные по амплитуде и длительности импульсы, чью частоту следования регистрировал частотомер, данные с которого также передавались в компьютер для обеспечения комплексного анализа результатов измерений, в частности оценки влияния темновых импульсов.

Отметим, что амплитуда и длительность темновых импульсов была близка к амплитуде и длительности однофотонных импульсов. Поэтому для отделения темновых импульсов от однофотонных за одинаковый промежуток времени подсчитывались импульсы, возникающие в Si-ФЭУ при наличии оптического излучения, а затем при его отсутствии. После этого находилась разность между значениями числа импульсов, полученных при наличии и в отсутствие оптического излучения.

В экспериментальной установке предусмотрена возможность замены Si-ФЭУ на другие типы фотоприемников. Это позволяет проводить сравнение характеристик фотоприемников. В качестве фотоприемников, с которыми осуществлялось сравнение Si-ФЭУ в данной работе, выступали лавинные фотодиоды КОФ101. Они достаточно хорошо зарекомендовали себя при работе в режиме однофотонной регистрации [7].

Величина электрического тока, протекающего через фотоприемник, контролировалась амперметром А. Поскольку исследуемые лавинные фотоприемники имели различные напряжения пробоя $U_{пр}$, то для сравнения их характеристик между собой использовалась величина перенапряжения $\Delta U = U - U_{пр}$, где U – напряжение питания фотоприемника. Напряжения пробоя лавинных фотоприемников определялись по их вольт-амперной характеристике в соответствии с методикой работы [6].

Исследования проводились при температурах от 203 до 303 К, поскольку именно в этом диапазоне температур наиболее часто эксплуатируются Si-ФЭУ. Длина волны оптического излучения равнялась 650 нм, что соответствовало максимуму спектральной чувствительности изучаемых Si-ФЭУ. Для исследования был выбран диапазон перенапряжений $\Delta U = -0,15 \div 0,25$ В. Это связано с тем, что при $\Delta U < -0,15$ В однофотонные импульсы в Si-ФЭУ не формировались. При $\Delta U > 0,25$ В значительно возрастает электрический ток, протекающий через Si-ФЭУ, что могло привести к тепловому пробую умножителя.

Результаты измерения и их обсуждение. Выполненные измерения показали, что при напряжениях питания близких, соответствующих и превышающих напряжение пробоя $U_{пр}$, на нагрузочном резисторе R_n формировались однофотонные импульсы со средней амплитудой 13 мВ и длительностью 1,5–2,1 мкс для рабочей температуры Si-ФЭУ $T = 293$ К. Длительность фронта нарастания этих импульсов не превышала 0,26 мкс и практически не изменялась от температуры. Длительность спада τ_c импульсов зависела от температуры и уменьшалась с ростом T . Так, при температуре $T = 203$ К длительность спада импульсов была равна $\tau_c = 0,50$ мкс, для $T = 303$ К $\tau_c = 0,35$ мкс. Такое уменьшение длительности спада было связано со снижением сопротивления Si-ФЭУ R_{Si} с ростом температуры. Отметим, что для температуры $T = 203$ К значение сопротивления $R_{Si} = 5,9$ кОм, а для $T = 303$ К $R_{Si} = 1,5$ кОм.

Средняя амплитуда импульсов на выходе усилителя увеличивалась с уменьшением температуры, и при $T = 203$ К ее значение составляло 31 мВ. Увеличение амплитуды импульсов связано с ростом коэффициента усиления Si-ФЭУ при уменьшении температуры [8]. Отметим, что зависимость амплитуды импульсов от температуры была линейной. Величина отношения изменения средней амплитуды импульсов ΔA к изменению температуры ΔT составляла $\Delta A / \Delta T = -0,18$ мВ/К.

Для определения возможности реализации режима однофотонной регистрации для Si-ФЭУ исследовались зависимости скорости счета однофотонных импульсов n_c на выходе умножителя от интенсивности регистрируемого оптического излучения J . Под n_c понимается количество однофотонных импульсов, зарегистрированных за единицу времени. На рис. 2 представлены зависимости n_c от J для разных перенапряжений ΔU , полученные при температуре 293 К.

Как видно из рис. 2, данные зависимости имеют линейный участок, наличие которого свидетельствует, что Si-ФЭУ могут работать в режиме однофотонной регистрации при значениях J , соответствующих данному участку.

Возрастание перенапряжения Si-ФЭУ приводило к увеличению длины линейного участка зависимости n_c от J . Отметим, что диапазон линейности определялся по 5%-ному отклонению зависимости от линейной. Так, для $\Delta U = -0,1$ В диапазон линейности был равен $n_c = (0 \div 4,0) \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ и максимальное значение интенсивности, соответствующее этому диапазону, составляло $J_{\max} = 0,2 \cdot 10^{-7} \text{ Вт/см}^2$. Для $\Delta U = 0,0$ В диапазон линейности $n_c = (0 \div 1,3) \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ и $J_{\max} = 0,5 \cdot 10^{-7} \text{ Вт/см}^2$; для $\Delta U = 0,1$ В диапазон линейности $n_c = (0 \div 2,0) \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ и $J_{\max} = 0,6 \cdot 10^{-7} \text{ Вт/см}^2$; для $\Delta U = 0,2$ В диапазон линейности $n_c = (0 \div 2,6) \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ и $J_{\max} = 0,7 \cdot 10^{-7} \text{ Вт/см}^2$. Увеличение длины линейного участка связано с тем, что с ростом ΔU уменьшается постоянная времени Si-ФЭУ, которая зависит от сопротивления и собственной емкости фотоприемника [6]. Отметим, что для $\Delta U \leq 0,0$ В сопротивление и собственная емкость Si-ФЭУ уменьшались с ростом напряжения питания. При напряжениях питания, превышающих напряжение пробоя, значение сопротивления оставалось постоянным, а собственная емкость Si-ФЭУ незначительно уменьшалась.

Также с ростом ΔU увеличивался угол наклона линейного участка зависимости скорости счета однофотонных импульсов от интенсивности оптического излучения. Это связано с тем, что с ростом перенапряжения увеличивается квантовая эффективность регистрации Si-ФЭУ. Понижение температуры не приводило к изменению угла наклона линейного участка при постоянных значениях ΔU .

Скорость счета однофотонных импульсов при постоянных J и ΔU оставалась неизменной во всем рассматриваемом интервале температур. Это свидетельствует о том, что для данных Si-ФЭУ квантовая эффективность регистрации не зависит от T в исследуемом диапазоне температур.

На рис. 3 представлены зависимости скорости счета темновых и однофотонных импульсов, а также отношения сигнал/шум от величины перенапряжения ΔU .

Зависимости скорости счета импульсов и отношения сигнал/шум представлены для постоянных значений температуры $T = 293$ К и интенсивности оптического излучения $J = 0,7 \cdot 10^{-7} \text{ Вт/см}^2$. Отметим, что для интенсивностей $J \leq 1,0 \cdot 10^{-7} \text{ Вт/см}^2$ эти зависимости были аналогичными. Для интенсивностей $J > 1,0 \cdot 10^{-7} \text{ Вт/см}^2$ измерения не выполнялись, так как начинало наблюдаться насыщение во всем исследуемом диапазоне перенапряжений.

С увеличением перенапряжения возрастала скорость счета темновых импульсов n_t (см. рис. 3). При значениях перенапряжений $\Delta U \leq 0,0$ В скорость счета темновых импульсов

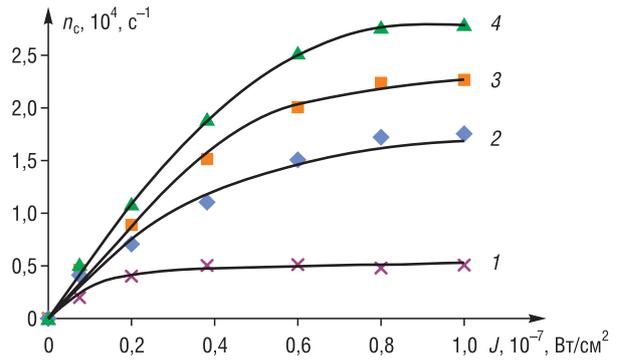


Рис. 2. Зависимости скорости счета однофотонных импульсов n_c от интенсивности регистрируемого оптического излучения: 1 – для перенапряжения $\Delta U = -0,1$ В; 2 – для перенапряжения $\Delta U = 0,0$ В; 3 – для перенапряжения $\Delta U = 0,1$ В; 4 – для перенапряжения $\Delta U = 0,2$ В

Fig. 2. Dependences of the count rate of single-photon pulses n_c on the intensity of the detected optical radiation: 1 – for overvoltage $\Delta U = -0.1$ V; 2 – for overvoltage $\Delta U = 0.0$ V; 3 – for overvoltage $\Delta U = 0.1$ V; 4 – for overvoltage $\Delta U = 0.2$ V

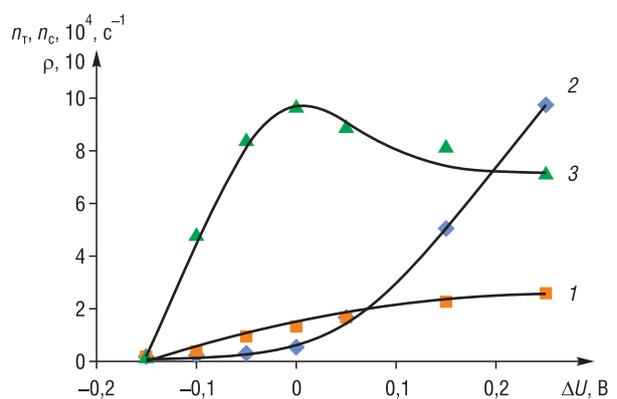


Рис. 3. Зависимости скорости счета однофотонных, темновых импульсов и отношения сигнал/шум от перенапряжения: 1 – скорость счета однофотонных импульсов, 2 – скорость счета темновых импульсов, 3 – отношение сигнал/шум

Fig. 3. Dependences of the counting speed of single-photon, dark pulses and the signal-to-noise ratio from overvoltage: 1 – count rate of single-photon pulses, 2 – count rate of dark pulses, 3 – signal-to-noise merit

Si-ФЭУ не превышала $5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$. Дальнейшее возрастание перенапряжения приводило к более значительному увеличению скорости счета темновых импульсов по сравнению с $\Delta U \leq 0,0 \text{ В}$. Так, при $\Delta U = 0,1 \text{ В}$ $n_T = 3,1 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$, а для $\Delta U = 0,2 \text{ В}$ n_T возрастала до $7,5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$. Такое поведение зависимости n_T от ΔU можно объяснить различием в напряжениях пробоя каждого из p - n -переходов Si-ФЭУ, которые близки между собой, но не одинаковы. Поэтому при значениях напряжения питания $\Delta U \leq 0,0 \text{ В}$ для меньшего числа p - n -переходов напряжение питания Si-ФЭУ будет превосходить напряжения их пробоя. Отметим, что только эти p - n -переходы смогут сформировать темновые импульсы. При $\Delta U > 0,0 \text{ В}$ для большего количества p - n -переходов напряжение питания Si-ФЭУ начинает превосходить напряжения их пробоя.

Также с ростом перенапряжения увеличивается объем области, в которой происходит лавинообразное размножение носителей заряда [6]. Увеличение этой области приводит к тому, что в нее может попадать все большее число термогенерированных носителей заряда, что обуславливает рост вероятности появления темновых импульсов, а следовательно, увеличение значения n_T .

Уменьшение температуры при постоянном значении ΔU приводило к снижению скорости счета темновых импульсов. Это обусловлено тем, что при уменьшении температуры уменьшается число термогенерированных свободных носителей заряда и вероятность вызвать темновой импульс становится меньше, а значит, снижается и скорость счета темновых импульсов.

Зависимость между n_T и T имела близкий к линейному вид. Так, для $\Delta U = 0,1 \text{ В}$ при $T = 303 \text{ К}$ $n_T = 3,5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$, при $T = 203 \text{ К}$ $n_T = 1,2 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$, а величина отношения изменения скорости счета темновых импульсов тока Δn_T к изменению температуры ΔT составляла $\Delta n_T / \Delta T = 230 \text{ с}^{-1} / \text{К}$. Увеличение перенапряжения приводило к уменьшению отношения $\Delta n_T / \Delta T$. Например, при $\Delta U = 0,2 \text{ В}$ величина соотношения равнялась $\Delta n_T / \Delta T = 116 \text{ с}^{-1} / \text{К}$.

Увеличение перенапряжения приводило к росту скорости счета однофотонных импульсов n_c в интервале перенапряжений $\Delta U = -0,1 \div 0,05 \text{ В}$ (см. рис. 3). При $\Delta U > 0,05 \text{ В}$ наблюдалось насыщенные зависимости n_c от ΔU .

Отношение сигнал/шум ρ определялось по формуле $\rho = \frac{n_c}{\sqrt{n_c + n_T}}$. Зависимость ρ от перена-

пряжения имеет максимум (см. рис. 3), который соответствовал перенапряжению $\Delta U = 0,0 \text{ В}$. Для этого значения перенапряжения $n_c > n_T$ и разность между скоростями счета однофотонных и темновых импульсов была наибольшей.

Рост зависимости отношения сигнал/шум от перенапряжения для значений $\Delta U \leq 0,0 \text{ В}$ связан с тем, что при этих перенапряжениях наблюдалось увеличение разности между скоростями счета однофотонных и темновых импульсов. Для $\Delta U > 0,0 \text{ В}$ эта разность уменьшалась. Таким образом, наблюдался спад зависимости ρ от ΔU .

Понижение температуры приводило к увеличению значения ρ , соответствующего максимуму зависимости отношения сигнал/шум от перенапряжения. Так, для $T = 303 \text{ К}$ отношение сигнал/шум составило $\rho = 96$, а для $T = 203 \text{ К}$ равнялось $\rho = 192$. При этом смещение максимума зависимости ρ от ΔU не происходило. Увеличение значения ρ , соответствующее максимуму этой зависимости, с понижением температуры обусловлено тем, что n_T уменьшается при снижении температуры. Для получения максимальной чувствительности Si-ФЭУ необходимо выбирать перенапряжение, соответствующее этому максимуму.

Также выполнено сравнение чувствительности Si-ФЭУ и кремниевых ЛФД. При сравнении чувствительности фотоприемников определялось минимальное значение интенсивности оптического излучения J_{\min} , которое они могли зарегистрировать. Так, для $T = 303 \text{ К}$ и максимума отношения сигнал/шум для этих фотоприемников минимальные значения интенсивности оптического излучения составляли следующие значения: $J_{\min} = 0,8 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/см}^2$ для Si-ФЭУ и $J_{\min} = 1,5 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/см}^2$ для ЛФД. Понижение температуры до 203 К приводило к уменьшению минимального значения интенсивности оптического излучения, и для Si-ФЭУ $J_{\min} = 0,2 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/см}^2$, а для ЛФД $J_{\min} = 1,2 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/см}^2$. Таким образом, Si-ФЭУ имеют более высокую чувствительность по сравнению с ЛФД.

Чувствительность Si-ФЭУ в режиме одноквантовой регистрации более чем в 10 раз превосходила его чувствительность в токовом режиме. Значение минимальной регистрируемой интенсивности в токовом режиме при температуре $T = 303 \text{ К}$ и максимуме отношения сигнал/шум составляло $0,9 \cdot 10^{-7} \text{ Вт/см}^2$. С уменьшением температуры данное превосходство увеличивалось.

Заклучение. Показана возможность работы кремниевых фотоэлектронных умножителей со структурой $p^+ - p - n^+$ производства ОАО «Интеграл» в режиме одноквантовой регистрации.

Установлено, что зависимость отношения сигнал/шум от перенапряжения для этих кремниевых фотоэлектронных умножителей имеет максимум. Для получения максимальной чувствительности исследованных кремниевых фотоэлектронных умножителей необходимо выбирать перенапряжение, соответствующее этому максимуму.

Показано, что исследованные кремниевые фотоэлектронные умножители, работающие в режиме одноквантовой регистрации, обладают более высокой чувствительностью по сравнению с кремниевыми лавинными фотодиодами КОФ101 в этом же режиме работы.

Полученный результат можно использовать в системах квантовой криптографии при передаче оптических данных.

Список использованных источников

1. Квантовая криптография: идеи и практика / С.Я. Килин [и др.]; под ред. С.Я. Килина, Д.Б. Хорошко, А.П. Низовцева. – Минск: Белорус. наука, 2007. – 391 с.
2. Hacking commercial quantum cryptography systems by tailored bright illumination / L. Lydersen [et al.] // *Nature Photonics*. – 2010. – Vol. 4, № 10. – P. 686–689. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2010.214>
3. Василю, Е.В. Квантовые системы обеспечения информационной безопасности: учеб.-метод. пособие / Е.В. Василю, И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич. – Минск: Белорус. гос. акад. связи, 2019. – 216 с.
4. Исследование двухрежимной работы лавинных фотодиодов при регистрации оптического излучения / О.Ю. Горбадей [и др.] // *Приборы и техника эксперимента*. – 2019. – №2. – С. 81–85. <https://doi.org/10.1134/S0032816219020113>
5. Towards Optical Partial Discharge Detection with Micro Silicon Photomultipliers / Ming Ren [et al.] // *Sensors*. – 2017. – Vol. 17, № 11. – P. 2595. <https://doi.org/10.3390/s17112595>
6. Гулаков, И.Р. Фотоприемники квантовых систем / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич. – Минск: УО ВГКС, 2012. – 276 с.
7. Исследование статистического распределения одноквантовых импульсов лавинных фотоприемников / И.Р. Гулаков [и др.] // *Приборы и техника эксперимента*. – 2010. – №4. – С. 92–97.
8. Асаёнок, М.А. Температурные характеристики кремниевых фотоэлектронных умножителей / М.А. Асаёнок, А.О. Зеневич, О.Ю. Горбадей // *Доклады БГУИР*. – 2018. – №2 (112). – С. 54–58.

References

1. Kilin S. Ya., Khoroshko D. B., Nizovtsev A. P., eds. *Quantum Cryptography: Ideas and Practice*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2007. 391 p. (in Russian).
2. Lydersen L., Wiechers C., Wittmann C., Elser D., Skaar J., Makarov V. Hacking commercial quantum cryptography systems by tailored bright illumination. *Nature Photonics*, 2010, vol. 4, no. 10, pp. 686–689. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2010.214>
3. Vasiliu E. V., Gulakov I. R., Zenevich A. O. *Quantum Systems for Ensuring Information Security*. Minsk, Belarusian State Academy of Communications, 2019. 216 p. (in Russian).
4. Gorbadey O. Y., Zenevich A. O., Novikov E. V., Goibov S. A. Investigation of the two-mode operation of avalanche photodiodes in the registration of optical radiation. *Instruments and Experimental Techniques*, 2019, vol. 62, no. 2, pp. 81–85. <https://doi.org/10.1134/s0020441219020106>
5. Ming Ren, Jierui Zhou, Bo Song, Chongxing Zhang, Ming Dong, Albarracín R. Towards Optical Partial Discharge Detection with Micro Silicon Photomultipliers. *Sensors*, 2017, vol. 17, no. 11, p. 2595. <https://doi.org/10.3390/s17112595>
6. Gulakov I. R., Zenevich A. O. *Photodetectors of Quantum Systems*. Minsk, Higher State College of Communications, 2012. 276 p. (in Russian).
7. Gulakov I. R., Zalesky V. B., Zenevich A. O., Korytko N. N., Malyshev V.S. Investigation of the statistical distribution of single-quantum pulses of avalanche photodetectors. *Instruments and Experimental Techniques*, 2010, vol. 53, no. 4, pp. 92–97. <https://doi.org/10.1134/s0020441210040159>
8. Asayonak M. A., Gorbadey O. Y., Zenevich A. O. Temperature characteristics of silicon photoelectronic multipliers. *Doklady BGUIR*, 2018, no. 2 (112), pp. 54–58 (in Russian).

Информация об авторах

Асаёнок Марина Анатольевна – аспирант, Белорусская государственная академия связи (ул. Ф. Скорины, 8/2, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: m.asayonok@bsac.by

Information about the authors

Maryna A. Asayonak – Postgraduate Student, Belarusian State Academy of Communications (8/2, F. Skorina Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: m.asayonok@bsac.by

Зеневич Андрей Олегович – доктор технических наук, профессор, ректор Белорусской государственной академии связи (ул. Ф. Скорины, 8/2, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: a.zenevich@bsac.by

Кочергина Ольга Викторовна – аспирант, Белорусская государственная академия связи (ул. Ф. Скорины, 8/2, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: o.kochergina@bsac.by

Новиков Евгений Владимирович – кандидат технических наук, доцент, директор Института современных технологий связи учреждения образования «Белорусская государственная академия связи» (ул. Ф. Скорины, 8/2, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: e.novikov@bsac.by

Сорока Сергей Александрович – ведущий инженер ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» Национальной академии наук Беларуси (Логойский тракт, 22, 220090, Минск, Республика Беларусь). E-mail: soroca@oelt.basnet.by

Andrey O. Zenevich – D. Sc. (Engineering), Professor, Rector of Belarusian State Academy of Communications (8/2, F. Skorina Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: a.zenevich@bsac.by

Volha V. Kocharhina – Postgraduate Student, Belarusian State Academy of Communications (8/2, F. Skorina Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: o.kochergina@bsac.by

Yauhen V. Novikau – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Director of the Institute of Modern Communication Technologies of Belarusian State Academy of Communications (8/2, F. Skorina Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: e.novikov@bsac.by

Syargey A. Saroka – Leading Engineer, State Scientific-Production Association “Optics, Optoelectronics and Laser Technology” of the National Academy of Sciences of Belarus (22, Logoiskij tract, 220090, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: soroca@oelt.basnet.by

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)
УДК 629.7.028.6
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-357-364>

Поступила в редакцию 05.02.2020
Received 05.02.2020

С. С. Тихончик¹, Н. И. Пучко²

¹ОАО «Авиакомпания «Белавиа»», Минск, Республика Беларусь

²Белорусская государственная академия авиации, Минск, Республика Беларусь

НИЗКОДАВЛЯЮЩАЯ ФОРСУНКА С АЭРОДИНАМИЧЕСКИМ РАСПЫЛОМ ТОПЛИВА

Аннотация. Проведено исследование с построением модели низконапорной форсунки с аэродинамическим распылом топлива, которое раскрывает преимущества форсунок такого типа. С целью сокращения времени на стадии разработки и проведения расчетов применялись современные системы автоматизированного проектирования. Исследования проведены в модуле Flow Simulation программного комплекса SolidWorks, позволяющем рассчитать и построить модель внутреннего обтекания форсунки по уже известным параметрам. Предполагаемая конструкция форсунки подвергалась воздействию условий, соответствующих реальным параметрам. Эти условия задавались через панель граничных условий программы: секундный расход топлива; скорость воздушного потока на входе в форсунку; статическое давление в камере сгорания. Расчеты, выполненные модулем, позволили оценить технологичность конструкции, а также внутренние процессы смешения топлива с воздухом. Для определения качества мелкодисперсности распыла топлива рассчитана модель поля скоростей по всему сечению форсунки, из которого видно, что максимальная скорость истечения топлива достигается в выходных каналах топливного распылителя форсунки. Полученные результаты свидетельствуют о работе принципа низконапорности с сохранением качественного распыла топлива. Применение низконапорных форсунок с аэродинамическим распылом возможно в современных газотурбинных двигателях гражданских самолетов, а также в газотурбинных установках.

Ключевые слова: двигатель, форсунка, мелкодисперсность, низконапорность, поле скоростей, смешение топлива, коллектор, расход, эмиссия

Для цитирования: Тихончик, С. С. Низконапорная форсунка с аэродинамическим распылом топлива / С. С. Тихончик, Н. И. Пучко // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, №3. – С. 357–364. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-357-364>

Stanislav S. Tihonchik¹, Nikolay I. Puchko²

¹JSC “Belavia” – Belarusian Airlines”, Minsk, Republic of Belarus

²Belarusian State Academy of Aviation, Minsk, Republic of Belarus

LOW-PRESSURE NOZZLE WITH AERODYNAMIC FUEL ATOMIZATION

Abstract. A research was carried out with the construction of a model of a low-pressure nozzle with aerodynamic fuel atomization, which shows the advantages of nozzles of this type. In order to reduce the time at the stage of development and calculations, modern computer design systems were used. The research was carried out in the Flow Simulation module of the SolidWorks software package, which allows you to calculate and build a model of the internal flow around the nozzle using already known parameters. These parameters were set through the program conditions panel: fuel consumption per second; air flow rate at the inlet to the nozzle; static pressure in the combustion chamber. The calculations performed by the module made it possible to evaluate the manufacturability of the design, as well as the internal processes of mixing fuel with air. To determine the quality of fine dispersion of the fuel atomization, a model of the velocity field was calculated over the entire section of the nozzle, from which it can be seen that the maximum flow rate of the fuel is achieved in the outlet channels of the fuel atomizer of the nozzle. The results obtained indicate the operation of the low-pressure principle while maintaining high-quality fuel atomization. The use of low-pressure nozzle with aerodynamic fuel atomization is possible in modern gas turbine engines of civil aircraft, as well as in gas turbine.

Keywords: engine, nozzle, fine dispersion, low pressure, velocity field, fuel mixing, manifold, flow rate, emission

For citation: Tihonchik S. S., Puchko N. I. Low-pressure nozzle with aerodynamic fuel atomization. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 3, pp. 357–364 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-357-364>

Введение. Основными тенденциями и задачами в области создания перспективных газотурбинных двигателей (ГТД) летательных аппаратов всех типов являются:

создание методов и средств повышения эффективности процессов смешения и горения;

обеспечение снижения эмиссии вредных веществ за счет применения средств интенсификации процессов горения.

Для решения этих задач постоянно внедряются различные доработки и изменения в конструкции двигателей, которые улучшают топливную экономичность, сокращают вредные выбросы в атмосферу, снижают шумовое загрязнение. Прежде всего это ввод в эксплуатацию сложных цифровых систем, контролирующих топливную автоматику, установка новых типов камер сгорания, применение форсунок с аэродинамическим распылом топлива вместо двухканальных центробежных.

В камерах сгорания ГТД для распыливания топлива в основном используются двухконтурные двухсопловые центробежные форсунки высокого давления, которые работают в широком диапазоне изменения расхода топлива. Так, у воздушно-реактивного двигателя при переходе с режима максимальной тяги у земли на режим сильного дросселирования на большой высоте расход топлива уменьшается в 20–30 раз. В простой центробежной форсунке расход топлива приблизительно равен корню квадратному из перепада давления на форсунке

$$G_T = \sqrt{\Delta P_\Phi},$$

таким образом, для увеличения расхода топлива в 30 раз требуется увеличить перепад давления в 900 раз. Применяемые в настоящее время топливные насосы обеспечивают максимальное давление перед форсунками $\sim (7,5-8,0) \cdot 10^6$ Па. Оно не может быть существенно повышено без усложнения и утяжеления топливной аппаратуры и уменьшения ее надежности. Если максимальное давление подачи составляет $(7,5-8,0) \cdot 10^6$ Па, то для уменьшения расхода в 30 раз необходимо снизить давление до $(8,0-9,0) \cdot 10^3$ Па. Но при столь низком давлении топливная струя, вытекающая из форсунки, уже практически не распадается на капли, образуя пузырь. Очевидно, что простые струйные и центробежные форсунки в интервале давления $(0,3-8,0) \cdot 10^6$ Па не могут обеспечить требуемого диапазона изменения расхода топлива. Следовательно, возникает потребность в применении форсунок, у которых расход с увеличением давления подачи возрастает быстрее, чем у известных. То есть требуемый диапазон изменения расхода топлива должен достигаться в сравнительно узком интервале давлений подачи при заданном качестве распыла.

Еще одним из основных недостатков двухконтурной двухсопловой центробежной форсунки высокого давления является повышенная неравномерность подачи топлива в момент включения II контура из-за подключения форсунок к различным точкам топливного коллектора. В этот момент давление топлива во II контуре соизмеримо со статическим перепадом давлений, вызванным разностью уровней топлива в верхних и нижних форсунках, что является причиной появления повышенной неравномерности производительности. В [1] отмечено, что в двухсопловой двухконтурной форсунке обеспечивается высокое качество распыливания топлива при низких расходах благодаря большому перепаду давлений в узких тангенциальных каналах внутренней форсунки. В момент открытия клапана основного контура форсунки качество распыливания топлива ухудшается вследствие невысокого давления подачи топлива, а затем, с ростом расхода – улучшается.

Проводились исследования влияния силы тяжести на распределение топлива в многофорсуночных системах, используемых в большинстве ГТД [2]. Неудовлетворительное распределение топлива происходит при низком давлении подачи, когда гидростатическое давление становится существенным для верхних форсунок. Неравномерное распределение в процессе заполнения основного топливного коллектора с последовательным подключением отдельных форсунок оказывает влияние на эффективность работы камеры сгорания. Выявлено значительное падение среднемассовой полноты сгорания топлива в диапазоне расходов, соответствующих области подключения основного контура двухконтурной двухсопловой форсунки. Данный факт потребовал дальнейшего исследования проблем, возникающих в процессе заполнения основного топливного коллектора в составе ГТД.

Для оценки заполнения основного топливного коллектора была создана двумерная модель ГТД. Двумерность модели проявляется в неравномерном распределении топлива по топливному коллектору. Это обусловлено тем, что в форсунках, находящихся на различных уровнях, давление топлива отличается вследствие влияния сил гравитации. В свою очередь, это приводит к тому, что в жаровых трубах топливо сгорает с различной полнотой и массовый расход топлива через них неодинаков. Результатом является возникновение окружной неравномерности среднемассовых

температур по жаровым трубам. Кроме того, неравномерность распределения топлива по топливному коллектору приводит к изменению параметров потока по длине газозвдушного тракта двигателя. С целью оценки работы, а также визуализации внутреннего смешения топливовоздушной смеси проведено исследование с построением модели низконапорной форсунки с аэродинамическим распылом топлива, которое раскрывает преимущества форсунок такого типа.

Работа низконапорной форсунки с аэродинамическим распылом. Преимущества низконапорной форсунки с аэродинамическим распылом топлива. На сегодняшний день серийных двигателей с такими форсунками не существует. Всеми известными производителями авиационных газотурбинных двигателей ведутся исследования и разработки низконапорных систем подачи топлива с возможностью внедрения в двигатели следующего поколения.

Из-за невозможности существующими форсунками обеспечить требуемый диапазон изменения расхода топлива в интервале давления $(0,3-8,0) \cdot 10^6$ Па возникает необходимость в применении форсунок, у которых расход с увеличением давления подачи возрастает быстрее, чем у известных. Кроме того, одной из важнейших задач при разработке форсунок является снижение уровня дымления и эмиссии загрязняющих веществ. Основное внимание уделяется снижению в продуктах сгорания несгоревших углеводородов, монооксида углерода и оксида азота.

Так как конструкция таких форсунок включает в себя только один контур, их применение позволяет отказаться от двухконтурного топливного коллектора, тем самым исключить повышенную неравномерность подачи топлива в момент включения второго контура. Отказ от двухконтурного топливного коллектора ведет за собой снижение массы топливной системы в целом. Возможность достижения требуемого расхода топлива в малом интервале позволяет применять топливные насосы меньшей производительности, что влечет за собой снижение их массы и повышение надежности.

Низконапорные форсунки удовлетворяют всем предъявляемым к конструкции требованиям по качеству распыла, а также задают новые требования по работе в значительно узком интервале давлений подачи, которые в будущем могут стать определяющими.

Аэродинамический распыл, применяемый в таких форсунках, обеспечивает ряд преимуществ: мелкодисперсное распыление топлива в одном или двух поясах при пониженном давлении его подачи в камеру сгорания, что увеличивает поверхность контакта топлива с воздухом в смеси и способствует высокой эффективности горения, расширенное изменение расхода топлива, а также рост полноты сгорания топлива на всех режимах работы двигателя;

достаточное проникновение распыленного топлива в газовую среду;

ускорение горения закрученной в воздушном канале топливовоздушной смеси, что сокращает время ее пребывания в зоне горения и снижает уровень дымления и эмиссии в продуктах сгорания;

исключение возможности попадания пламени из камеры сгорания внутрь воздушного канала;

предотвращение оседания топлива на элементах конструкции форсунки на режимах запуска и останова двигателя.

Работа низконапорной форсунки с аэродинамическим распылом топлива. Низконапорная форсунка с аэродинамическим распылом, представленная на рис. 1, имеет полый корпус 1 воздушного канала 2 с участком сужения 3. Корпус снабжен лопаточным завихрителем воздуха 4 на входе и установленным по его оси до минимального поперечного сечения 5 распылителем топлива 6. Распылитель топлива 6 внутри снабжен центробежной головкой шнека 13, которая обеспечивает закрутку топлива, подводимого по каналу 7 на вход в форсунку. Форсунка имеет вихревую камеру 8 с соплом 9 на выходе.

Лопатки 10 завихрителя воздуха 4 выполнены со сквозными отверстиями по радиусу, а их выходные кромки 11 по радиусу имеют сквозные отверстия 12. Завихритель топлива на входе в вихревую камеру 8 выполнен в виде шнека 13 со сквозными винтовыми канавками 14 на его наружной поверхности.

Вихревая камера 8 через равномерно расположенные по окружности сквозные, наклонные к оси отверстия 15 перепуска топлива в шнеке 13 и магистраль 16, в которой установлен перепускной клапан 17 с корпусом 18, соединена с отверстиями 19 лопаток 10 завихрителя воздуха 4.

Стенка 20 вихревой камеры 8 со стороны сопла 9 выполнена сферической и снабжена расположенными равномерно по окружности наклонными к оси сквозными отверстиями 21.

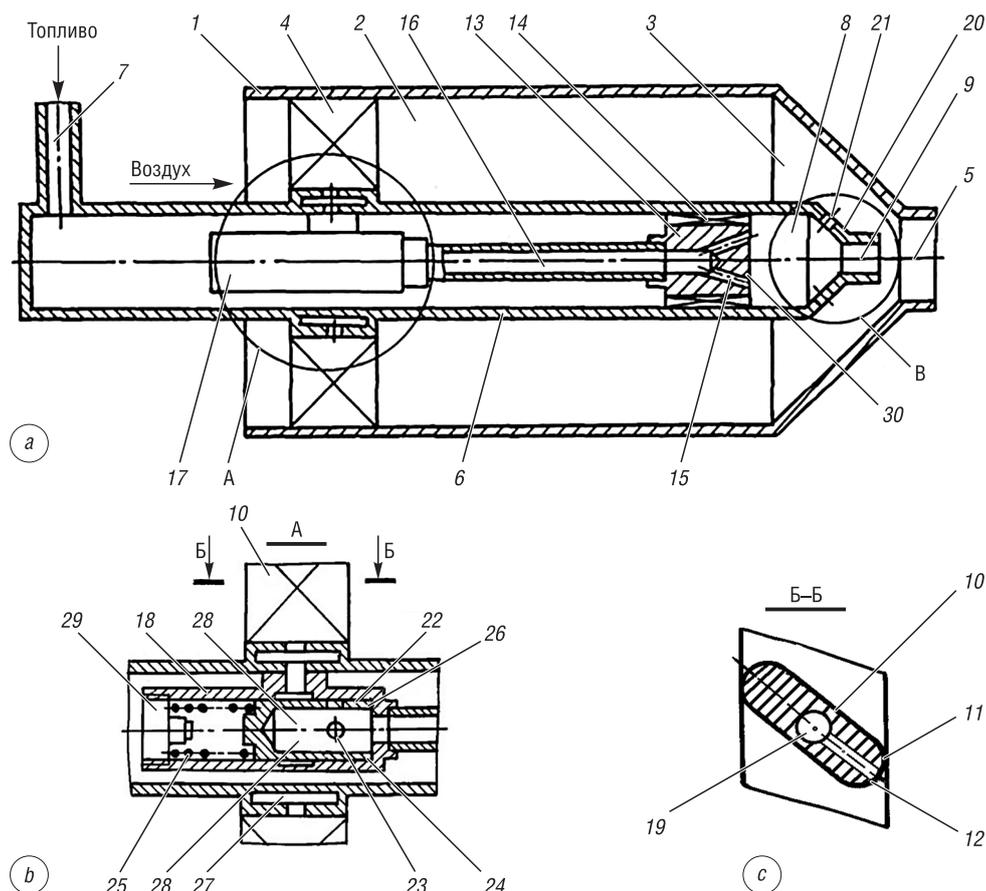


Рис. 1. Низконапорная форсунка с аэродинамическим распылом: *a* – общий вид, *b* – пере-
пускной клапан, *c* – разрез лопатки завихрителя воздуха

Fig. 1. Low-pressure nozzles with aerodynamic spray: *a* – general form, *b* – bypass valve, *c* – air
swirl blade section

Перепускной клапан 17 (см. рис. 1, *a*, *b*) содержит полый плунжер 22 со сквозными отверстиями 23 в боковой стенке 24, установленный внутри корпуса 18, который поджат пружиной 25 до упора в торцевую кромку 26 корпуса 18.

Корпус распылителя 6 в зоне лопаток 10 (см. рис. 1, *a*, *b*) завихрителя воздуха 4 внутри снабжен кольцевым топливным коллектором 27, сопряженным гидравлически с внутренними полостями 19 лопаток 10 и через отверстия 23 с полостью 28 плунжера 22. Пружина 25 в корпусе 18 поджата резьбовой пробкой 29. Входы 30 в отверстия 15 перепуска топлива в шнеке 13 расположены на середине вихревой камеры 8 под винтовыми канавками 14 шнека 13.

Представленная конструкция низконапорной форсунки требует для работы существенно меньших давлений топлива и позволяет реализовать аэродинамический распыл, обеспечивающий перечисленные преимущества.

Методика проведения исследования. Для изучения изменения параметров потока воздуха и течения топлива внутри низконапорной форсунки с аэродинамическим распылом, а также внутреннего смешения топлива с воздухом используется модуль Flow Simulation программного комплекса SolidWorks, позволяющий рассчитать и построить модель внутреннего обтекания форсунки по уже известным параметрам. Перед началом проведения исследования графическая модель низконапорной форсунки с аэродинамическим распылом загружается в указанный модуль. Для запуска расчета и построения модели задаются граничные условия с добавлением глобальных целей и внесением вспомогательных элементов в существующую модель форсунки. Добавление дополнительных элементов к существующей модели заключается в установке заглушек на все входные и выходные каналы. Данное действие необходимо для обеспечения работы модуля, так как рассчитываемый объем должен быть замкнутым.

Определение граничных условий является важной задачей, от которой зависит результат правильности построения моделей внутреннего обтекания и изменения параметров внутри форсунки.

Условия, соответствующие реальным параметрам ГТД, задаются через панель граничных условий программы:

- секундный расход топлива m ;
- скорость воздушного потока V на входе в форсунку;
- статическое давление P в камере сгорания.

Дополнительно модулю Flow Simulation задаются глобальные цели: определение скорости истечения топлива и распределение давления топлива по сечению форсунки. Рабочими средами для проведения расчета и построения модели внутреннего обтекания являются сжатый компрессором воздух и топливо, подаваемое насосом.

Программа расчета и построения модели внутреннего обтекания в топливном и воздушном каналах форсунки. Модуль Flow Simulation программного комплекса SolidWorks уже имеет в своем наборе различные формулы и функции, необходимые для выполнения расчета по заданным параметрам. Моделирование течения топлива и движения воздуха в форсунке будет производиться отдельно для двух сред с построением модели суммарного обтекания.

По заданным ранее параметрам, соответствующим номинальному режиму работы двигателя, производится расчет топливного канала низконапорной форсунки с аэродинамическим распылом. На рис. 2, 3 представлены рассчитанное внутреннее течение топлива с цветным графиком изменения скоростей в различных точках сечения.

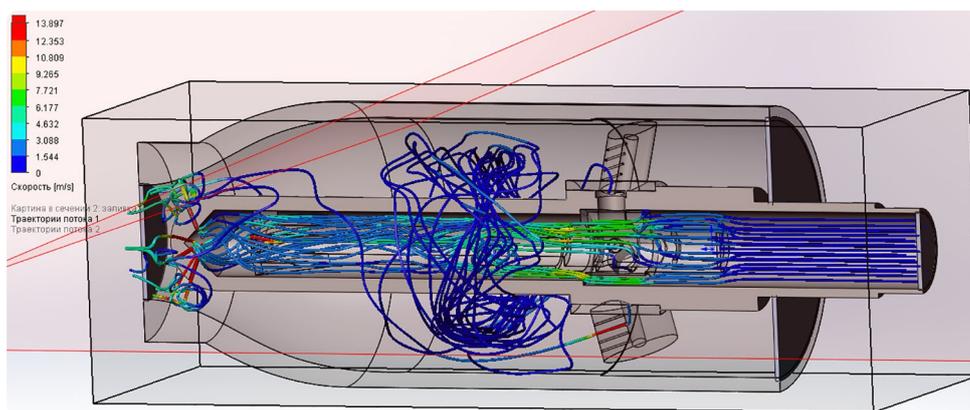


Рис. 2. Внутреннее течение топлива
Fig. 2. Internal fuel flow

Как видно из графика на рис. 3, максимальная скорость истечения достигается в каналах распылителя, что может гарантировать качественное распыление топлива. Аналогичным образом производится расчет воздушного канала форсунки. Скорость воздуха на входе в форсунку составляет 2 м/с. Картина внутреннего течения в воздушном канале представлена на рис. 4.

Из рассчитанного внутреннего течения видно, что лопаточный завихритель воздуха выполняет свою функцию в полном объеме, обеспечивая достаточное завихрение воздуха для последующего его смешения с топливом. Готовая модель низконапорной форсунки с совместной работой топливного и воздушного каналов получается путем одновременного запуска рассчитанных данных. Совместная работа воздушного и топливного каналов показана на рис. 5.

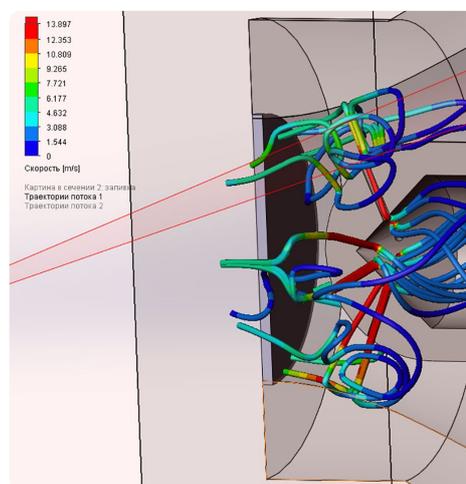


Рис. 3. График скоростей на выходе форсунки
Fig. 3. Output velocity graph

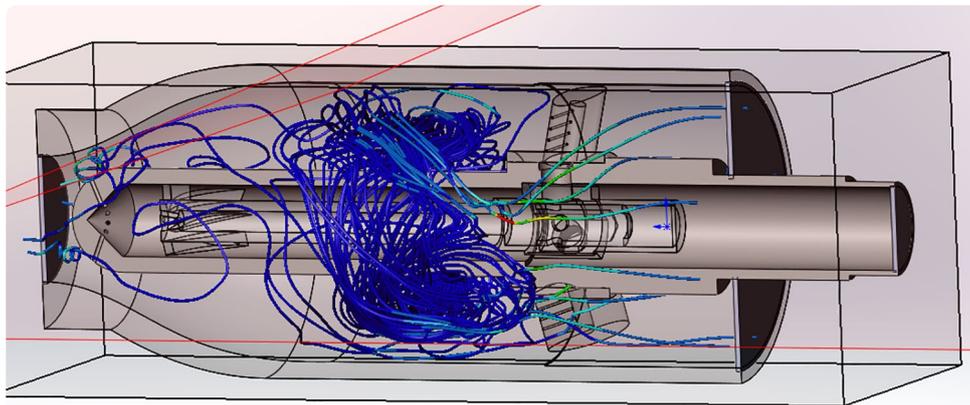


Рис. 4. Внутреннее течение воздуха в воздушном канале

Fig. 4. Internal air flow in the air channel

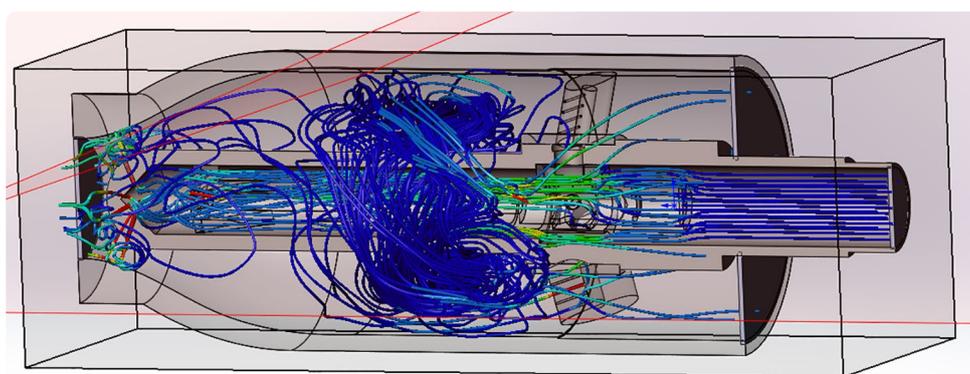


Рис. 5. Совместная работа воздушного и топливного каналов

Fig. 5. Joint operation of the air and fuel channels

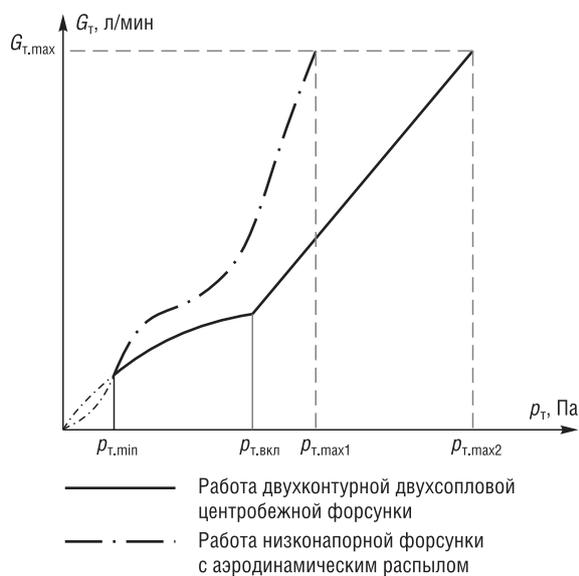


Рис. 6. Совместные рабочие характеристики низконапорной форсунки с аэродинамическим распылом топлива и двухконтурной центробежной форсунки высокого давления

Fig. 6. Joint performance characteristics of a low-pressure nozzle with aerodynamic fuel atomization and high-pressure centrifugal nozzle

Как видно из полученной модели, рассматриваемая конструкция форсунки позволяет выполнить качественное смешение воздуха с топливом и последующий мелкодисперсный распыл на выходе. Кроме рассчитанной и построенной модели внутреннего обтекания модулем Flow Simulation рассчитана модель изменения давления топлива, подводимого от насоса по сечениям форсунки, что свидетельствует о возможности применения топливных насосов с меньшим выходным давлением.

Результаты исследования свидетельствуют о действенности принципа понижения напорности форсунки с одновременным сохранением качества распыла. По сравнению с широко применяемыми в настоящее время центробежными форсунками требуемое качество распыла топлива достигается при давлении в 2 раза меньшем.

На рис. 6 представлены совместные рабочие характеристики низконапорной форсунки с аэродинамическим распылом топлива и двухконтурной центробежной форсунки

высокого давления. Очевидно, что максимальный расход топлива $G_{т.маx}$ может быть обеспечен при значительно меньшем давлении топлива $p_{т.маx1}$ на входе в форсунку с аэродинамическим распылом (на выходе из насоса), чем давление $p_{т.маx2}$ в двухконтурной центробежной форсунке. Этот факт подтверждает возможность применения топливных насосов с меньшим давлением на выходе, а следовательно, и меньшем отборе мощности на их вращение.

Дополнительно для оценки распыла топлива рассчитана модель поля скоростей по всей длине форсунки, анализ которой свидетельствует о том, что подобная конструкция позволяет обеспечить минимальный размер капель топлива за счет максимальной скорости его истечения из выходных каналов.

Заключение. Исследованная низконапорная форсунка с аэродинамическим распылом топлива благодаря своей конструкции и реализованному в ней принципу работы обладает следующими существенными преимуществами перед классическими центробежными:

- повышенное качество смешения топлива с воздухом;
- снижение уровня дымления и эмиссии вредных веществ в продуктах сгорания топлива;
- высокая эффективность горения и рост полноты сгорания топлива;
- способность обеспечить заданное качество распыливания топлива при низких перепадах давления топлива.

Сравнительный анализ расходных характеристик форсунок показывает, что при одном и том же давлении подачи топлива низконапорная форсунка с аэродинамическим распылом обеспечивает больший расход, чем двухконтурная центробежная форсунка высокого давления. Требуемый диапазон изменения расхода топлива достигается в сравнительно узком интервале давлений подачи $(0,3-8,0) \cdot 10^6$ Па.

Актуальность данной темы подтверждается работами по проектированию низконапорных систем подачи топлива всеми известными производителями авиадвигателей и их стремлением снизить массу топливных агрегатов с одновременным сокращением эмиссии вредных веществ.

Список использованных источников

1. Лефевр, А. Н. Процессы в камерах сгорания ГТД: пер. с англ. / А. Н. Лефевр. – М.: Мир, 1986. – 566 с.
2. Ахмедзянов, Д. А. Исследование влияния двухконтурности топливного коллектора на эффективность силовой установки в области заполнения основного контура / Д. А. Ахмедзянов, Ю. М. Ахметов, А. Е. Михайлов // Вестн. УГАТУ. – 2010. – Т. 14, №4. – С. 21–35.
3. Авиационные двухконтурные двигатели Д-30КУ и Д-30КП: конструкция, надежность и опыт эксплуатации / Л. П. Лозицкий [и др.]. – М.: Машиностроение, 1988. – 228 с.
4. Старцев, Н. И. Трубопроводы газотурбинных двигателей / Н. И. Старцев. – М.: Машиностроение, 1976. – 272 с.
5. Теория авиационных двигателей. Термодинамический анализ рабочего процесса ГТД прямой реакции / сост. Н. И. Пучко. – Минск: БГАА, 2015. – 55 с.
6. Иноземцев, А. А. Газотурбинные двигатели / А. А. Иноземцев, В. Л. Сандрацкий. – Пермь: Авиадвигатель, 2006. – 1204 с.
7. Теория авиационных двигателей: в 2 ч. / Ю. Н. Нечаев [и др.]. – М.: ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 2006. – 366 с. – Ч. 1, 2.
8. Скибин, В. А. Работы ведущих авиадвигателестроительных компаний по созданию перспективных авиационных двигателей / В. А. Скибин, В. И. Солонин; под ред. В. А. Скибина. – М.: ЦИАМ, 2004. – 424 с.
9. Wenger, U. Rolls-Royce Technology for Future Aircraft Engines / U. Wenger. – Rolls-Royce, 2014. – 40 p.
10. Storm, R. A Guide for Educators and Students with Chemistry, Physics, and Math Activities / R. Storm, M. Skor, L. D. Koch. – NASA, 2007. – 114 p.

References

1. Lefebvre A. N. *Gas Turbine Combustion*. CRC Press, 2010. 560 p.
2. Akhmedzyanov D. A., Akhmetov Yu. M., Mikhailov A. E. Investigation of the effect of dual-circuit fuel manifold on the efficiency of the power plant in the area of filling the main circuit. *Vestnik UGATU = Vestnik USATU*, 2010, vol. 14, no. 4, pp. 21–35 (in Russian).
3. Lozitsky L. P., Avdoshko M. D., Berezlev B. F., Gvozdetsky I. I., Ivanenko A. A., Molochnov M. A. *Aircraft Dual-Circuit Engines D-30KU and D-30KP: Design, Reliability and Operating Experience*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988. 228 p. (in Russian).
4. Starcev N. I. *Pipelines for Gas Turbine Engines*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 272 p. (in Russian).
5. Puchko N. I. (compiled). *Theory of Aircraft Engines. Thermodynamic Analysis of the Gas Turbine Engine Direct Reaction*. Minsk, Belarusian State Academy of Aviation, 2015. 55 p. (in Russian).

6. Inozemcev A. A., Sandratsky V.L. *Gas Turbine Engines*. Perm, Aviadvigatel Publ., 2006. 1204 p. (in Russian).
7. Nechaev U. N., Vedorev R. M., Kotovsky V. N., Polev A. S. *Theory of Aircraft Engines: in 2 parts*. Moscow, Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky, 2006. 366 p. (in Russian).
8. Skibin V. A., Solonin V.I. *The Work of Leading Aircraft Engine Companies to Create Promising Aircraft Engines*. Moscow, Central Institute of Aviation Motors, 2004. 424 p. (in Russian).
9. Wenger U. *Rolls-Royce Technology for Future Aircraft Engines*. Rolls-Royce, 2014. 40 p.
10. Storm R., Skor M., Koch L.D. *A Guide for Educators and Students with Chemistry, Physics, and Math Activities*. NASA, 2007. 114 p.

Информация об авторах

Тихончик Станислав Славамирович – инженер, ОАО «Авиакомпания “Белавиа”» (ул. Немига, 14А, 220004, Минск, Республика Беларусь). E-mail: Stanislau.Tsikhonchuk@belavia.by

Пучко Николай Иванович – старший преподаватель, Белорусская государственная академия авиации (ул. Уборевича, 77, 220096, Минск, Республика Беларусь). E-mail: department.toae@yandex.ru

Information about the authors

Stanislav S. Tihonchik – Engineer, JSC “Belavia” – Belarusian Airlines” (14A, Nemiga Str., 220004, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Stanislau.Tsikhonchuk@belavia.by

Nikolay I. Puchko – Senior Lecturer, Belarusian State Aviation Academy (77, Uborevich Str., 220096, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: department.toae@yandex.ru

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

УДК 681.7.023.72

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-365-374>

Поступила в редакцию 13.02.2020

Received 13.02.2020

А. С. Козерук¹, Р. О. Диас Гонсалес^{1,2}, А. А. Сухоцкий¹, М. И. Филонова¹¹*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*²*Университетский политехнический институт Сантьяго Мариньо, Мериды, Боливарианская Республика Венесуэла*

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ ОБРАБОТКИ АКСИКОНОВ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ

Аннотация. Получено аналитическое выражение для инженерного расчета закономерностей съема припуска с плоской поверхности детали (правильника в виде плоской стеклянной пластины значительной толщины с отверстиями для заготовок аксиконов), которая участвует в относительном и переносном движении по поверхности вращающегося инструмента (планшайбы) и находится с ним в силовом замыкании, обеспечивающем автоматическую самоустановку притирающихся поверхностей. Предложена схема разбиения притирающихся поверхностей плоского инструмента и детали на кольцевые зоны и сектора, в результате чего образуются элементарные площадки с опорными (расчетными) точками в их центре. Для расчета координат данных точек получены аналитические выражения. Рассмотрена кинематика относительного движения инструмента и правильника без осцилляции верхнего звена, при этом скольжение сопряженных поверхностей обусловлено вращением инструмента и правильника, установленных с определенным эксцентриситетом. Получено выражение для определения скорости скольжения в любой точке контакта сопряженных поверхностей. Выполнено моделирование при обработке с относительным и переносным движениями верхнего звена, позволившее получить формулу для скорости скольжения правильника относительно инструмента, что дает возможность рассчитать пути трения в той или иной зоне последнего при различных режимах работы технологического оборудования. Моделирование может быть положено в основу создания методики управления процессом формообразования конических оптических деталей (аксиконов) на серийных рычажных шлифовально-полировальных станках плоским инструментом в условиях свободного притирания, обеспечивающей возможность получения аксиконов с отклонением образующей конуса от прямолинейности не более $\pm 0,00012$ мм.

Ключевые слова: коническая поверхность, свободное притирание, правильник, рычажный станок, математическое моделирование, опорные точки, относительное движение, трехгранник Френе

Для цитирования: Моделирование рабочей зоны обработки аксиконов на технологическом оборудовании / А. С. Козерук [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, №3. – С. 365–374. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-365-374>

Albin S. Kozeruk¹, Rafael Orlandos Diaz Gonzalez^{1,2}, Alexander A. Sukhotsky¹, Marina I. Philonova¹¹*Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus*²*Santiago Marino University Polytechnic Institute, Merida, Bolivarian Republic of Venezuela*

SIMULATION OF AXICON PROCESSING AREA ON TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

Annotation. An analytical expression is obtained for engineering calculation of the regularities of removing the allowance from the flat surface of the part (a rectangle in the form of a flat glass plate of considerable thickness with holes for axicon blanks), which participates in relative and portable movement on the surface of a rotating tool (faceplate) and is in a power circuit with it, which provides automatic self-installation of lapping surfaces. A scheme is proposed for dividing the lapping surfaces of a flat tool and part into ring zones and sectors, resulting in the formation of elementary platforms with reference (calculated) points in their center. Analytical expressions are obtained for calculating the coordinates of these points. The kinematics of the relative movement of the tool and the straightener without oscillation of the upper link is considered, while the sliding of the conjugate surfaces takes place due to rotation of the tool and the straightener installed with a certain eccentricity. An expression is obtained for determining the sliding speed at any point of contact of the conjugate surfaces. Modeling when dealing with relative and portable movement of the upper unit, which allowed obtaining a formula for the slip velocity of the straightener relative to the tool that allows calculation the path of friction in a particular zone in different modes of operation of technological equipment. Modeling can be used as the basis for creating a method for controlling the process of forming conical optical parts (axicons) on serial lever grinding and polishing machines with a flat tool under free lapping conditions, which provide the possibility of obtaining axicons with a deviation of the forming cone from the straightness of no more than ± 0.00012 mm.

Keywords: conical surface, free rubbing, straightener, lever machine, mathematical modeling, pivot points, relative motion, Frene trihedron

For citation: Kozeruk A. S., Diaz Gonzalez R. O., Sukhotsky A. A., Philonova M. I. Simulation of axicon processing area on technological equipment. *Vestsi Natsyonal'noi akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 3, pp. 365–374 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-365-374>

Введение. Одним из методов получения оптических деталей с конической поверхностью может быть обработка по методу свободного притирания образующей конической заготовки к плоской поверхности инструмента с использованием рычажных станков [1]. Однако в процессе такого притирания происходит неравномерное срабатывание инструмента, что в свою очередь приводит к отклонению образующей конуса от прямолинейности, поскольку обсуждаемый способ обработки основан на копировании заготовкой детали рабочей поверхности инструмента. Следовательно, для получения конических изделий надлежащего уровня качества должна быть организована непрерывная правка изборожденной рабочей поверхности инструмента и обеспечена необходимая ее плоскостность. Эта задача решается, как показано в [1], совмещением обработки конической детали с формообразованием рабочей поверхности инструмента, которое предлагается выполнять специальным правильником в виде стеклянной пластины. При этом для разработки инженерных методов управления процессом формообразования исполнительской поверхности инструмента требуется предварительно выполнить математическое моделирование:

- 1) геометрических и кинематических связей базового станка;
- 2) плоских притирающихся поверхностей инструмента и правильника;
- 3) процесса формообразования плоских поверхностей.

Первая задача решена в [1]. *Целью данной статьи* является решение второй из отмеченных проблем.

Детали с коническими поверхностями часто используются в машиностроении, где их получают в жестких осях на металлообрабатывающем оборудовании (Способ обработки конических поверхностей вращения: пат. 2 131 325 РФ, МПК В 23В 5/38 / В. В. Лоцманенко, М. В. Лоцманенко; Станок для обработки конических сопрягаемых поверхностей: пат. 2 016 704 РФ, МПК В 23В 5/38 / А. М. Мелай и др.; Способ обработки конической поверхности детали: пат. 2 071 395 РФ, МПК В 23С 3/04 / И. А. Марченко, Ю. Н. Зорин, В. В. Щенев; Устройство для обработки конических поверхностей: пат. 2 065 801 РФ, МПК В 23В 41/06 / Н. К. Гришко и др.).

Такой метод получения изделий данного класса для оптического приборостроения неприемлем, поскольку на точность образующей конуса (прямолинейность и правильную геометрическую форму поперечного сечения по всей высоте конуса) влияют вибрации технологического оборудования 1-го и 2-го рода (соответственно в системе «заготовка» и в системе «инструмент»).

Отмеченных недостатков лишена обработка деталей с коническими поверхностями по методу свободного притирания, когда заготовка самоустанавливается по рабочей поверхности плоского вращающегося инструмента. При этом она совершает сложное перемещение, состоящее из вращательного и переносного (колебательного) движений, а ее контакт с обрабатываемой поверхностью осуществляется силовым замыканием (Устройство для обработки деталей с коническими поверхностями: пат. 17 104 Респ. Беларусь, МПК В 24В 13/00 / А. С. Козерук и др.; Устройство для групповой обработки деталей с коническими поверхностями: пат. 21 163 Респ. Беларусь, МПК В 24В 13/02 / А. С. Козерук и др.).

Для поддержания необходимой плоскостности рабочей поверхности инструмента, с которой в процессе обработки контактирует образующая конуса, предлагается использовать правильник в виде стеклянной пластины с точной рабочей поверхностью и с отверстиями для конических заготовок.

Моделирование обрабатываемой поверхности правильника и рабочей поверхности инструмента. Для оценки формы обработанной поверхности правильника и сработанной рабочей поверхности инструмента необходимо выбрать на них достаточно большое количество точек, называемых в дальнейшем опорными, и определить срабатывание в этих точках.

С учетом того, что в процессе обработки конических деталей происходит срабатывание как инструмента (нижнее звено), так и правильника (верхнее звено), следует принимать во внимание срабатывание рабочей поверхности нижнего и верхнего сопряженных звеньев.

С целью выбора опорных точек рабочую поверхность нижнего звена радиусом R_n разбиваем на n_n кольцевых зон размером Δr_n (рис. 1)

$$\Delta r_n = \frac{R_n}{n_n}$$

и пронумеруем их, начиная с центральной. Далее поверхность разбиваем на m_n секторов, размер $\Delta \psi_n$ которых определяется следующим образом:

$$\Delta \psi_n = \frac{2\pi}{m_n}.$$

Введем жестко связанную с нижним звеном полярную систему координат с полюсом в точке G и полярной осью x_n , направленной вдоль одного из лучей, ограничивающих секторы, которые пронумеруем, начиная от полярной оси, против часовой стрелки. В результате рабочая поверхность разбилась на $m_n n_n$ элементарных площадок $[ds_{ij}^H]$, $i = \overline{1, n_n}$, $j = \overline{1, m_n}$. Площадка $[ds_{ij}^H]$ представляет собой пересечение кольцевой зоны с номером i с j -м сектором.

На каждой элементарной площадке $[ds_{ij}^H]$ выберем в качестве опорной точку M_{ij}^H , расположенную на пересечении окружности, делящей пополам i -ю кольцевую зону, и луча, делящего пополам j -й сектор. Положение этой точки определяется двумя координатами – полярными радиусом r_i^H и углом ψ_j^H :

$$M_{ij}^H = M_{ij}^H(r_i^H, \psi_j^H).$$

В соответствии с построением полярные радиусы для всех опорных точек, лежащих в одной и той же кольцевой зоне, и полярные лучи для всех точек, лежащих в одном и том же секторе, равны:

$$r_i^H = i\Delta r_n - \frac{\Delta r_n}{2} = \Delta r_n \left(i - \frac{1}{2} \right),$$

$$\psi_j^H = j\Delta \psi_n - \frac{\Delta \psi_n}{2} \left(j - \frac{1}{2} \right).$$

Аналогичные соотношения можно записать для верхнего звена.

Кинематика относительного движения инструмента и правильного. Рассмотрим обработку плоских деталей без осцилляции верхнего звена (рис. 2). Относительное движение сопряженных поверхностей в этом случае

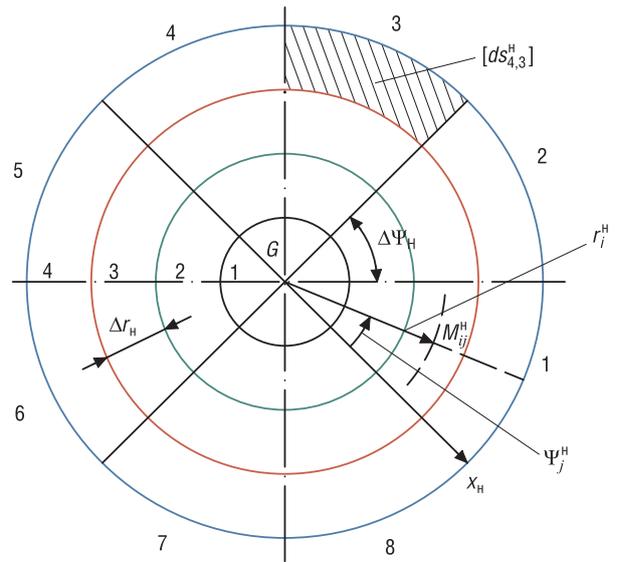


Рис. 1. Моделирование сопряженной поверхности нижнего звена

Fig. 1. Modeling of the conjugate surface of the lower element

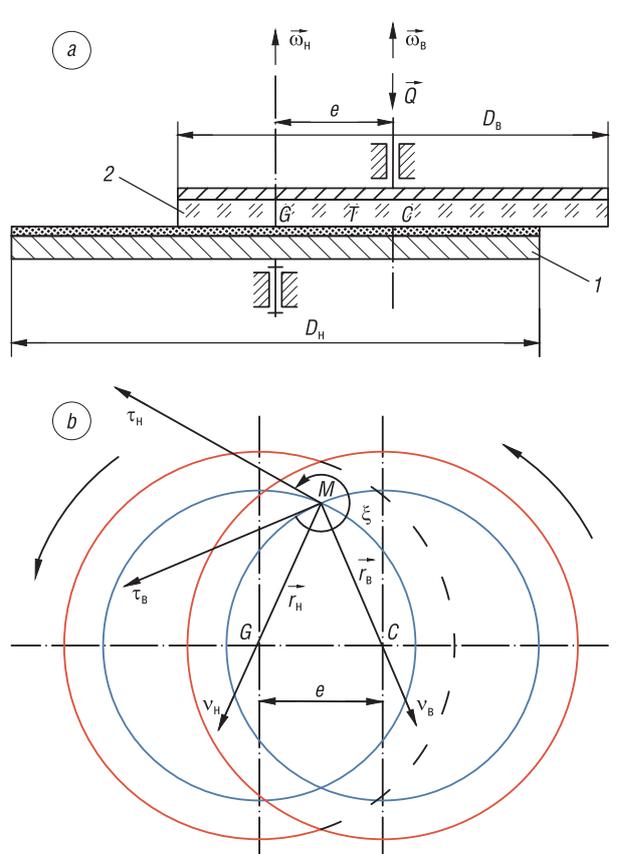


Рис. 2. Схема обработки плоских поверхностей без осцилляции верхнего звена: а – вид сбоку, б – вид сверху

Fig. 2. Processing scheme of flat surfaces without oscillation of upper element: a – side view, b – top view

осуществляется благодаря вращению инструмента I и правильника 2 вокруг своих осей, установленных с эксцентриситетом e [2].

Пусть верхнее звено вращается с угловой скоростью ω_B , нижнее – ω_H . В зоне контакта инструмента и правильника выберем произвольную точку M (рис. 2, b) и проведем через нее окружности на рабочих поверхностях нижнего и верхнего звеньев радиусами r_H и r_B соответственно.

Векторы линейных скоростей \vec{v}_H и \vec{v}_B движения нижнего и верхнего звеньев в данной точке равны:

$$\vec{v}_H = \vec{\omega}_H \times \vec{r}_H, \quad (1)$$

$$\vec{v}_B = \vec{\omega}_B \times \vec{r}_B. \quad (2)$$

Вектор скорости скольжения \vec{v} в точке M представим в виде

$$\vec{v} = \vec{v}_H - \vec{v}_B, \quad (3)$$

или

$$\vec{v} = \vec{v}_B - \vec{v}_H. \quad (4)$$

Первая запись определяет скорость скольжения нижнего звена относительно верхнего, вторая – скорость скольжения верхнего относительно нижнего в точке M . Эти скорости равны по модулю, но противоположны по направлению. С учетом (1)–(4) можно записать:

$$\vec{v} = \vec{\omega}_H \times \vec{r}_H - \vec{\omega}_B \times \vec{r}_B. \quad (5)$$

Проекции векторов, входящих в уравнение (5), удобнее записывать в системах координат, связанных с естественными трехгранниками Френе [3].

Введем системы координат $M\tau_H\nu_H\beta_H$ и $M\tau_B\nu_B\beta_B$, первая из которых связана с естественным трехгранником Френе, построенным на траектории абсолютного движения точки нижнего звена, совпадающей в рассматриваемый момент времени с сопряженной точкой M , а вторая аналогичным образом связана с верхним звеном (см. рис. 2, b). Оси $M\beta_H$ и $M\beta_B$ совпадают и направлены перпендикулярно рисунку.

В системе координат $M\tau_H\nu_H\beta_H$ векторы $\vec{\omega}_H$, \vec{r}_H и \vec{v}_H имеют следующие проекции:

$$\vec{\omega}_H = (0 \quad 0 \quad \omega_H)^T, \quad \vec{r}_H = (0 \quad -r_H \quad 0)^T, \quad \vec{v}_H = (\omega_H r_H \quad 0 \quad 0)^T.$$

Проекции вектора можно определить также из выражения (1) следующим образом:

$$\vec{v}_H = \vec{\omega}_H \times \vec{r}_H = \begin{pmatrix} \vec{\tau} & \vec{\nu} & \vec{\beta} \\ 0 & 0 & \omega_H \\ 0 & -r_H & 0 \end{pmatrix} = \omega_H r_H \vec{\tau} + 0\vec{\nu} + 0\vec{\beta}.$$

В системе координат $M\tau_B\nu_B\beta_B$ для верхнего звена имеем:

$$\vec{\omega}_B = (0 \quad 0 \quad \omega_B)^T, \quad \vec{r}_B = (0 \quad -r_B \quad 0)^T, \quad \vec{v}_B = (\omega_B r_B \quad 0 \quad 0)^T.$$

Следовательно, определены проекции векторов \vec{v}_H и \vec{v}_B в своих системах координат. Чтобы найти проекции вектора \vec{v} , надо знать проекции его составляющих \vec{v}_H и \vec{v}_B в какой-нибудь одной системе координат, например $M\tau_H\nu_H\beta_H$.

Установим связь между проекциями произвольного вектора \vec{l} в системах координат $Ox_1y_1z_1$ с $\vec{i}_1, \vec{j}_1, \vec{k}_1$ и $Ox_2y_2z_2$ с $\vec{i}_2, \vec{j}_2, \vec{k}_2$, имеющих общее начало.

Пусть проекции вектора \vec{l} в системе координат $Ox_1y_1z_1$ равны x_1, y_1, z_1 , а в системе координат $Ox_2y_2z_2$ – x_2, y_2, z_2 (рис. 3).

Выразим вектор в виде линейных комбинаций ортов систем координат $Ox_1y_1z_1$ и $Ox_2y_2z_2$:

$$\vec{l} = x_1\vec{i}_1 + y_1\vec{j}_1 + z_1\vec{k}_1, \vec{l} = x_2\vec{i}_2 + y_2\vec{j}_2 + z_2\vec{k}_2.$$

Проекцию x_1 вектора \vec{l} в системе координат $Ox_1y_1z_1$ можно записать в виде скалярного произведения этого вектора на вектор \vec{i}_1 : $x_1 = \vec{i}_1 \vec{l}$. Соответственно $y_1 = \vec{j}_1 \vec{l}$, $z_1 = \vec{k}_1 \vec{l}$, $x_2 = \vec{i}_2 \vec{l}$, $y_2 = \vec{j}_2 \vec{l}$, $z_2 = \vec{k}_2 \vec{l}$.

Если в выражение для x_2, y_2, z_2 подставим \vec{l} в виде линейной комбинации ортов системы координат $Ox_1y_1z_1$, то получим:

$$x_2 = \vec{i}_2 (x_1 \vec{i}_1 + y_1 \vec{j}_1 + z_1 \vec{k}_1),$$

$$y_2 = \vec{j}_2 (x_1 \vec{i}_1 + y_1 \vec{j}_1 + z_1 \vec{k}_1),$$

$$z_2 = \vec{k}_2 (x_1 \vec{i}_1 + y_1 \vec{j}_1 + z_1 \vec{k}_1).$$

Запишем эти уравнения в матричной форме:

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vec{i}_2 \vec{i}_1 x_1 + \vec{i}_2 \vec{j}_1 y_1 + \vec{i}_2 \vec{k}_1 z_1 \\ \vec{j}_2 \vec{i}_1 x_1 + \vec{j}_2 \vec{j}_1 y_1 + \vec{j}_2 \vec{k}_1 z_1 \\ \vec{k}_2 \vec{i}_1 x_1 + \vec{k}_2 \vec{j}_1 y_1 + \vec{k}_2 \vec{k}_1 z_1 \end{pmatrix}.$$

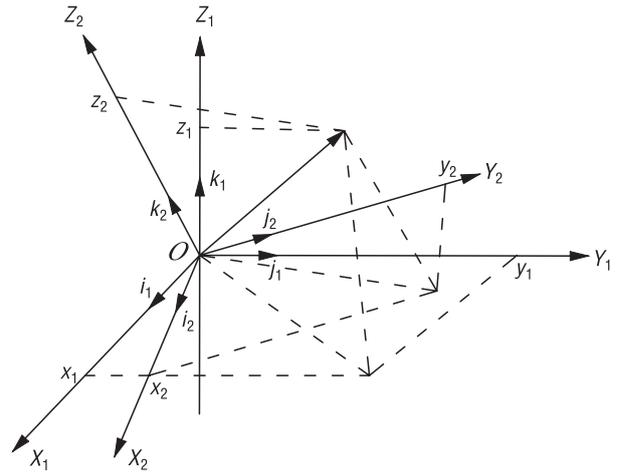


Рис. 3. Установление связи между проекциями вектора
Fig. 3. Establish the connection between the projections of the vector

Скалярные произведения единичных векторов равны косинусам углов между ними. Следовательно,

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_{i_2 i_1} x_1 + \cos \alpha_{i_2 j_1} y_1 + \cos \alpha_{i_2 k_1} z_1 \\ \cos \alpha_{j_2 i_1} x_1 + \cos \alpha_{j_2 j_1} y_1 + \cos \alpha_{j_2 k_1} z_1 \\ \cos \alpha_{k_2 i_1} x_1 + \cos \alpha_{k_2 j_1} y_1 + \cos \alpha_{k_2 k_1} z_1 \end{pmatrix}.$$

Здесь $\alpha_{i_2 i_1}$ – угол между векторами \vec{i}_1 и \vec{i}_2 , или, что то же самое, между осями Ox_1 и Ox_2 ; $\alpha_{i_2 j_1}$ – угол между осями Ox_2 и Oy_1 и т. д.

Введем обозначение

$$(M) = \begin{pmatrix} \cos \alpha_{i_2 i_1} & \cos \alpha_{i_2 j_1} & \cos \alpha_{i_2 k_1} \\ \cos \alpha_{j_2 i_1} & \cos \alpha_{j_2 j_1} & \cos \alpha_{j_2 k_1} \\ \cos \alpha_{k_2 i_1} & \cos \alpha_{k_2 j_1} & \cos \alpha_{k_2 k_1} \end{pmatrix}.$$

Тогда связь между координатами вектора запишется в виде

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} = (M) \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix}. \tag{6}$$

Таким образом, зная координаты вектора в системе координат $Ox_1y_1z_1$ и положение системы координат $Ox_2y_2z_2$ относительно $Ox_1y_1z_1$, с помощью уравнения (6) можно определить координаты этого вектора в системе координат $Ox_2y_2z_2$.

Чтобы получить выражение для расчета координат (x_1, y_1, z_1) по известным координатам (x_2, y_2, z_2) , необходимо повторить приведенные выкладки, подставляя в выражения для x_1, y_1, z_1 вектор \vec{l} в виде линейной комбинации ортов системы координат $Ox_2y_2z_2$.

Рассмотрим вид матрицы (M) в некоторых частных случаях.

Пусть известны координаты x_1, y_1, z_1 вектора \vec{l} в системе координат $Ox_1y_1z_1$. Необходимо получить координаты x_2, y_2, z_2 этого вектора в системе координат $Ox_2y_2z_2$, причем система координат $Ox_2y_2z_2$ получается из системы координат $Ox_1y_1z_1$ поворотом последней вокруг оси Oz_1 на угол ξ против часовой стрелки. Матрица (M) в этом случае принимает вид

$$(M_\xi) = \begin{pmatrix} \cos \xi & \cos\left(\frac{\pi}{2} + \xi\right) & 0 \\ \cos\left(\frac{\pi}{2} + \xi\right) & \cos \xi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \xi & \sin \xi & 0 \\ -\sin \xi & \cos \xi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Аналогично можно получить другие матрицы поворота:

1) если система координат $Ox_2y_2z_2$ совмещается с системой координат $Ox_1y_1z_1$ поворотом последней на угол ζ по часовой стрелке вокруг оси Oy_1 , то матрица поворота равна

$$(M_\zeta) = \begin{pmatrix} \cos \zeta & 0 & -\sin \zeta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \zeta & 0 & \cos \zeta \end{pmatrix}; \quad (8)$$

2) если система координат $Ox_2y_2z_2$ совмещается с системой координат $Ox_1y_1z_1$ поворотом последней вокруг оси Ox_2 против часовой стрелки на угол Δ , то

$$(M_\Delta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \Delta & \sin \Delta \\ 0 & -\sin \Delta & \cos \Delta \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Здесь рассмотрены случаи, когда новая система координат получается из старой поворотом последней вокруг одной из осей против часовой стрелки. Однако матрицами (7)–(9) можно пользоваться и тогда, когда поворот осуществляется по часовой стрелке. Для этого необходимо учитывать, что поворот по часовой стрелке на угол Δ равен повороту на угол $-\Delta$ против часовой стрелки.

Поскольку система координат $M_\tau v_H \beta_H$ получается из системы координат $M_\tau v_B \beta_B$ поворотом последней вокруг оси $M\beta_B$ против часовой стрелки на угол ξ (см. рис. 2), то матрица поворота имеет вид (7).

С учетом этого выражение для скорости относительного скольжения \vec{v} в координатной форме в системе координат $M_\tau v_H \beta_H$ будет иметь вид

$$\begin{pmatrix} v_\tau \\ v_v \\ v_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega_H r_H \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \cos \xi & \sin \xi & 0 \\ -\sin \xi & \cos \xi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_B r_B \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega_H r_H - \omega_B r_B \cos \xi \\ \omega_B r_B \sin \xi \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Получим выражение для угла ξ . Для этого рассмотрим, например, точки M_1, M_2 (рис. 4), расположенные в различных частях зоны контакта. Угол ξ отсчитываем от оси $M\tau_B$ до оси $M\tau_H$ против часовой стрелки. Тогда для точки M_1 из треугольника M_1GC по теореме косинусов можно записать

$$e^2 = r_H^2 + r_B^2 - 2r_H r_B \cos(2\pi - \xi),$$

откуда

$$\xi = -\arccos \frac{r_H^2 + r_B^2 - e^2}{2r_H r_B}.$$

Аналогичным образом найдем угол ξ для точки M_2 из треугольника M_2GC и полученные результаты обобщим следующим образом:

$$\xi = \pm \arccos \frac{r_H^2 + r_B^2 - e^2}{2r_H r_B}. \quad (11)$$

Используя выражения (10) и (11), можно вычислить координаты вектора относительной скорости \vec{v} и его модуль по формуле

$$v = \sqrt{v_{\tau_H}^2 + v_{v_H}^2 + v_{\beta_H}^2} = \sqrt{\omega_H^2 r_H^2 + \omega_B^2 r_B^2 - 2\omega_H r_H \omega_B r_B \cos \xi}.$$

Подставив в эту формулу выражение для $\cos \xi$, получим

$$v = \sqrt{\omega_H^2 r_H^2 + \omega_B^2 r_B^2 - \omega_H \omega_B (r_H^2 + r_B^2 - e^2)}. \quad (12)$$

По формуле (12) можно определить скорость скольжения в любой точке контакта сопряженных поверхностей.

Моделирование относительного движения инструмента и правильного при обработке с переносным движением верхнего звена. Рассмотрим схему обработки плоских поверхностей с возвратно-вращательным движением верхнего звена (рис. 5).

Скорость скольжения \vec{v} нижнего звена относительно верхнего в произвольной точке M зоны контакта определяется по формуле (3), абсолютная скорость v_H поверхности нижнего звена в этой точке – по формуле (1).

Абсолютная скорость верхнего звена в рассматриваемом случае складывается из скоростей вращения вокруг своей оси и возвратно-вращательного движения [4], то есть

$$\vec{v}_B = (\vec{\omega}_B \times \vec{r}_B) + \vec{v}_{B-B}. \quad (13)$$

Возвратно-вращательное движение верхнего звена представляет собой вращение вокруг центра O с угловой скоростью $\dot{\Psi}_C$. Линейная скорость в этом движении в точке M равна

$$\vec{v}_{B-B} = \dot{\Psi}_C \times \vec{r}_M, \quad (14)$$

где \vec{r}_M – радиус-вектор точки M в системе координат Oxy .

Из рис. 5 видно, что $\vec{r}_M = \vec{l}_{OC} + \vec{r}_2$. Подставив это выражение в (14), получим

$$\vec{v}_{B-B} = \dot{\Psi}_C \times (\vec{l}_{OC} + \vec{r}_B) = \dot{\Psi}_C \times \vec{l}_{OC} + \dot{\Psi}_C \times \vec{r}_B. \quad (15)$$

Таким образом, возвратно-вращательное движение верхнего звена может быть представлено как сумма переносного движения его центра C и относительного вращения вокруг этого центра.

Из записей (14) и (15) предпочтительнее последняя, так как в первой из них для каждой точки необходимо определять ее радиус-вектор в системе координат Oxy , составляющие же выражения (15) все известны.

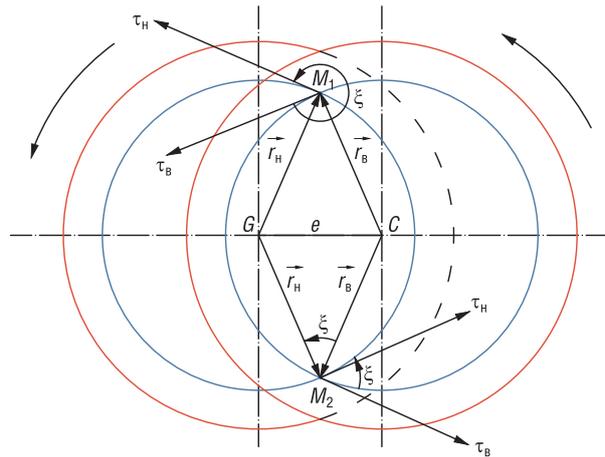


Рис. 4. Определение угла ξ
Fig. 4. Determination the angle ξ

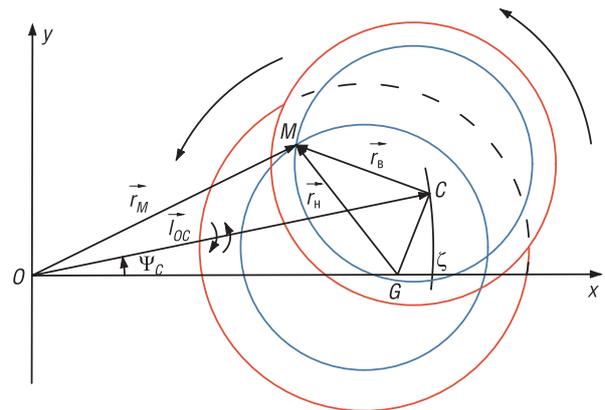


Рис. 5. Схема обработки с возвратно-вращательным движением верхнего звена
Fig. 5. Processing scheme with the reciprocating rotation of the upper element

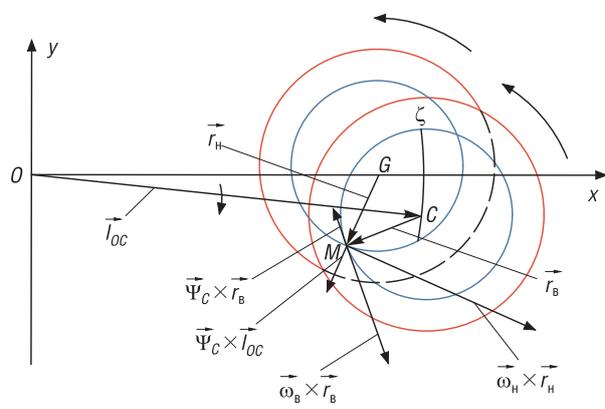


Рис. 6. Составляющие скорости скольжения
Fig. 6. Sliding speed components

Формула для скорости относительного скольжения с учетом (1)–(3) и (15) примет вид (рис. 6):

$$\vec{v} = \vec{\omega}_H \times \vec{r}_H - \vec{\omega}_B \times \vec{r}_B - \vec{\psi}_c \times \vec{l}_{OC} + \vec{\psi}_c \times \vec{r}_B. \quad (16)$$

Запишем уравнение (16) в координатной форме. С этой целью дополнительно к системе координат Oxy введем системы координат $M\tau_H\nu_H\beta_H$ и $M\tau_B\nu_B\beta_B$, связанные с естественными трехгранниками Френе.

Векторы $\vec{\omega}_H \times \vec{r}_H$, $\vec{\omega}_B \times \vec{r}_B$ в системах координат соответственно $M\tau_H\nu_H\beta_H$, $M\tau_B\nu_B\beta_B$ имеют проекции $(\omega_H r_H, 0, 0)$, $(\omega_B r_B, 0, 0)$, причем связь между этими проекциями устанавливается посредством матрицы поворота (7).

Как показано в [1], проекции вектора $\vec{\psi}_c \times \vec{l}_{OC}$ в системе координат Oxy равны $(-\psi_c l_{OC} \sin \psi_c, \psi_c l_{OC} \cos \psi_c, 0)$.

Если угол между осями Ox и $M\tau_H$, отсчитываемый от оси Ox против часовой стрелки, обозначить через λ (рис. 7), то связь между проекциями вектора в системах координат $Oxyz$ и $M\tau_H\nu_H\beta_H$ устанавливается с помощью матрицы поворота

$$(M_\lambda) = \begin{pmatrix} \cos \lambda & \sin \lambda & 0 \\ -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

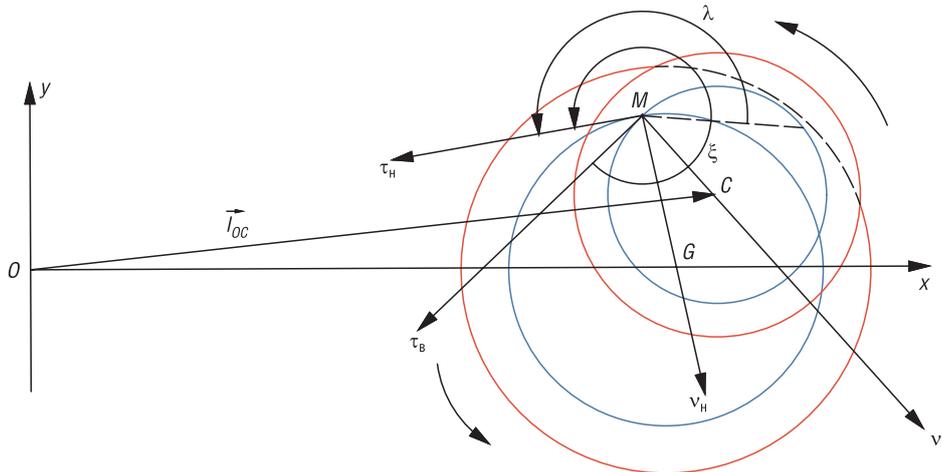


Рис. 7. Установление связи между координатами в различных системах координат

Fig. 7. Establish the relationship between coordinates in various coordinate systems

Вектор $\vec{\psi}_c$ перпендикулярен плоскости $M\tau_B\nu_B$, и в системе координат $M\tau_B\nu_B\beta_B$ его проекции равны $(0, 0, \psi_c)$. Тогда в системе координат $M\tau_B\nu_B\beta_B$ проекции вектора $\vec{\psi}_c \times \vec{r}_B$ будут $(\psi_c r_B, 0, 0)$.

С учетом приведенных значений проекций векторов выражение (16) можно записать

$$\begin{pmatrix} v_\tau \\ v_\nu \\ v_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega_H r_H \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} - (M_\xi) \begin{pmatrix} \omega_B r_B \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} - (M_\lambda) \begin{pmatrix} -\psi_c l_{OC} \sin \psi_c \\ \psi_c l_{OC} \cos \psi_c \\ 0 \end{pmatrix} - (M_\xi) \begin{pmatrix} \psi_c r_B \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega_H r_H - \omega_B r_B \cos \xi + \psi_c l_{OC} (\sin \psi_c \cos \lambda - \cos \psi_c \sin \lambda) - \psi_c r_B \cos \xi \\ \omega_B r_B \sin \xi - \psi_c l_{OC} (\sin \psi_c \sin \lambda + \cos \psi_c \cos \lambda) + \psi_c r_B \sin \xi \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (17)$$

Численное значение скорости v можно определить по формуле

$$v = \sqrt{v_\tau^2 + v_\nu^2 + v_\beta^2}.$$

Для определения угла λ , входящего в (17), рассмотрим точки M_1 и M_2 , расположенные в различных частях зоны контакта (рис. 8).

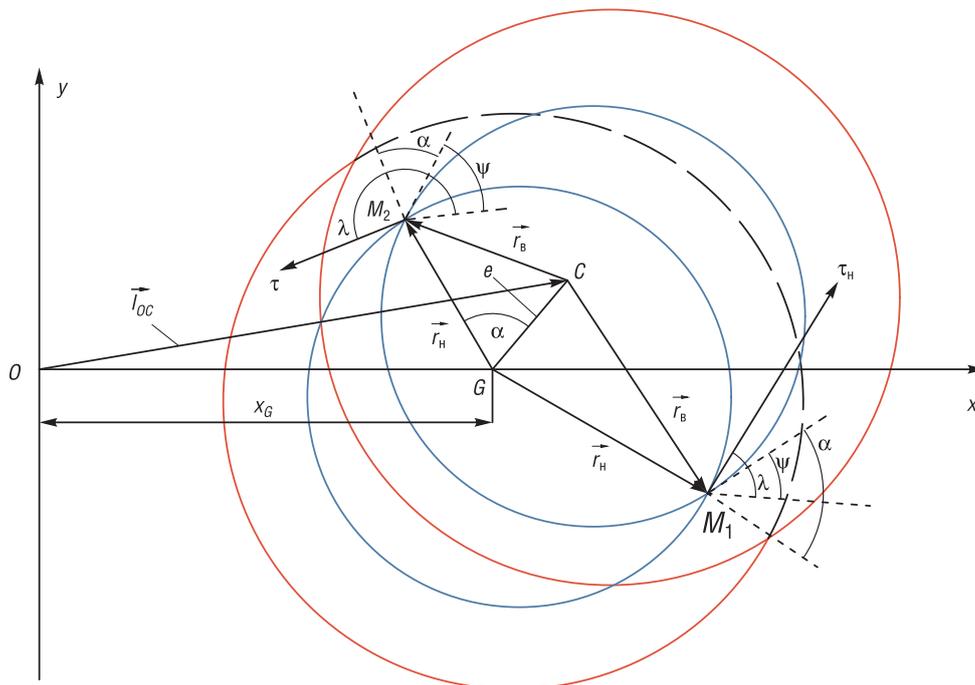


Рис. 8. Определение угла λ
 Fig. 8. Determination of the angle λ

Для точки M_2 угол λ можно представить в виде трех слагаемых: $\lambda = \Psi + \alpha + \frac{\pi}{2}$.

Углы Ψ и α определим по теореме косинусов из треугольников OCG и CGM_2 соответственно:

$$\Psi = \arccos \frac{l_{OC}^2 - x_G^2 - e^2}{2x_G e}, \alpha = \arccos \frac{r_H^2 + e^2 - r_B^2}{2r_H e}.$$

Для точки M_1 выражение для λ имеет вид $\lambda = \Psi + \left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)$.

Таким образом, угол λ определяется по формуле

$$\lambda = \Psi + \frac{\pi}{2} \pm \arccos \frac{r_H^2 + e^2 - r_B^2}{2r_H e}, \tag{18}$$

причем знак «+» необходимо выбирать для левых точек, «-» – для правых.

Закключение. Рассмотренный метод обработки конусов может быть использован при формообразовании деталей данного типа из различных материалов в условиях свободного притирания на рычажных станках посредством гибкого регулирования наладочных параметров последних.

Предложенная схема разбиения притирающихся поверхностей плоского инструмента и правильного позволила получить аналитические выражения для определения координат опорных точек на этих поверхностях, что необходимо при моделировании процесса обработки в условиях свободного притирания, обеспечивающего равномерное распределение путей трения по рабочей поверхности инструмента и гарантирующего стабильность ее плоскостности.

Полученная формула для скорости скольжения правильного относительно плоского инструмента позволяет рассчитать пути трения в той или иной зоне последнего при различных режимах работы технологического оборудования, что может быть положено в основу создания методики управления процессом формообразования конических деталей (аксиконов) на рычажных станках с точки зрения характера распределения подлежащего удалению припуска.

Список использованных источников

1. Кинематический анализ способа, повышающего точность обработки конических поверхностей / А. С. Козерук [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2020. – Т. 65, №2. – С. 197–204. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-197-204>
2. Зубаков, В. Г. Технология оптических деталей / В. Г. Зубаков, М. Н. Семибратов, С. К. Штандель; под ред. М. Н. Семибратова. – М.: Машиностроение, 1985. – 368 с.
3. Козерук, А. С. Формообразование прецизионных поверхностей / А. С. Козерук. – Минск: ВУЗ-ЮНИТИ, 1997. – 176 с.
4. Технология оптических деталей / М. Н. Семибратов [и др.]; под ред. М. Н. Семибратова. – М.: Машиностроение, 1978. – 415 с.

References

1. Kozeluk A. S., Dias Gonsales R. O., Filonova M. I., Kuznechik V. O., Varopay E. N. Kinematic analysis of the method increasing the accuracy of treatment of conic surfaces. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 2, pp. 197–204 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-197-204>
2. Zubakov V. G., Semybratov M. N., Standel S. K. *Optical Parts Technology*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 368 p. (in Russian).
3. Kozeluk A. S. *Shaping Precision Surfaces*. Minsk, VUZ-UNITI Publ., 1997. 176 p. (in Russian).
4. Semibratov M. N., Zubakov V. G., Shtandel' S. K., Kuznetsov S. M. *Technology of Optical Parts*. Moscow Mashinostroenie Publ., 1978. 415 p. (in Russian).

Информация об авторах

Козерук Альбин Степанович – доктор технических наук, профессор, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: akozeryk@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0001-5484-9294>

Диас Гонсалес Рафаэль Орландос – аспирант, Университетский политехнический институт Сантьяго Мариньо (Мерида, Боливарианская Республика Венесуэла). E-mail: raordigon.088@gmail.com

Сухоцкий Александр Анатольевич – старший преподаватель, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: suhotskiy.a@bntu.by

Филонова Марина Игоревна – кандидат технических наук, доцент, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: filonovami@mail.ru

Information about the authors

Albin S. Kozeluk – D. Sc. (Engineering), Professor, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: akozeryk@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0001-5484-9294>

Rafael Orlandos Dias Gonsales – Graduate Student, Instituto Universitario Politecnico Santiago Marino (Merida, Bolivarian Republic of Venezuela). E-mail: raordigon.088@gmail.com

Alexander A. Sukhotski – Senior Lecturer, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: suhotskiy.a@bntu.by

Marina I. Filonova – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: filonovami@mail.ru

ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ
DIAGNOSTICS AND SAFETY OF TECHNICAL AND ENVIRONMENT SYSTEMS

УДК 629.3.018
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-375-383>

Поступила в редакцию 20.03.2020
Received 20.03.2020

А. С. Гурский, В. С. Ивашко

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРАНСПОРТНОЙ ТЕЛЕМАТИКИ И ДИСТАНЦИОННОЙ
ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ
И РЕМОНТА ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

Аннотация. Рассматривается возможность применения планово-предупредительной системы в современных условиях. Система телематики транспортных средств и дистанционной диагностики позволяют автоматизировать получение корректирующих коэффициентов для определения нормативных значений трудоемкости технического обслуживания и ремонта и производить расчеты, как предполагается, с приемлемой для прикладного применения точностью. Пробег до капитального ремонта или списания транспортного средства, установленный заводом-изготовителем, также корректируется с учетом коэффициентов. Использование средств навигации позволяет определять расположение транспортного средства в координатах карт навигации с характеристиками дорожного покрытия, населенного пункта, с определением высоты над уровнем моря и дорожно-климатического районирования. Данный способ является альтернативным решением, позволяющим автоматизировать пробеги и трудоемкость технических воздействий и может быть применен для уточнения параметров. Для реализации заложенных принципов предлагается блок-схема обработки данных транспортной телематики с целью определения корректирующих коэффициентов с последующим расчетом периодичностей и трудоемкостей. Предложенная блок-схема реализуется стандартной системой телематики транспортного средства, однако возможна модернизация с возможностью дистанционной диагностики, позволяющей выполнять функции общей диагностики отдельных систем и транспортного средства в целом. Использование систем мониторинга транспорта позволяет усовершенствовать систему технического обслуживания и ремонта. Анализ существующих требований, регламентируемых документами в ракурсе возможностей современных систем транспортной телематики, позволяет обосновать и развивать новый подход к расчету пробегов до технических воздействий и скорректировать нормативы трудоемкостей выполнения этих воздействий. Внедрение функции общей дистанционной диагностики отдельных систем и транспортного средства в целом делает возможным исключение погрешности при расчетах корректирующих коэффициентов, а также упреждение возникновения отказов в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: техническое, обслуживание, ремонт, корректирующие, коэффициенты, транспортная, телематика, дистанционная, диагностика

Для цитирования: Гурский, А. С. Использование транспортной телематики и дистанционной диагностики для совершенствования технического обслуживания и ремонта транспортных средств / А. С. Гурский, В. С. Ивашко // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, №3. – С. 375–383. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-375-383>

Alexander S. Gurski, Viktor S. Ivashko

Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

**USING TRANSPORT TELEMATICS AND REMOTE DIAGNOSTICS TO IMPROVE VEHICLE MAINTENANCE
AND REPAIR**

Abstract. The article considers the possibility of using planned-prevention system in modern conditions. The system of vehicle telematics and remote diagnostics allows you to automate the getting of correction coefficients to determine the standard values of labor intensity of maintenance and repair and make calculations with high accuracy. The mileage before

major repairs or write-off of the vehicle set by the manufacturer is also corrected for coefficients. The use tools of navigation allows you to determine the location of the vehicle in the coordinates of navigation maps with characteristics of the road surface, locality, with the definition of height above sea level and road-climate zoning. This method is an alternative solution that allows you to automate the mileage and labor intensity of technical actions and can be used to clarification parameters. To implement these principles, we propose a flowchart for processing transport telematics data for calculating correction coefficients, followed by calculating the periodicity and labor intensity. The proposed flowchart is implemented by a standard vehicle telematics system, but it can be upgraded with the possibility of remote diagnostics, which allows performing the functions of general diagnostics of individual systems and the vehicle as a whole. The use of systems of transport monitoring make it possible to improve the system of maintenance and repair. Analysis of the existing requirements regulated by documents in the perspective of the capabilities of modern transport telematics systems allows us to justify and create a new approach to the calculation of mileage before technical impacts and adjust the standards for the complexity of performing these impacts. The introduction of the general remote diagnostics function for individual systems and the vehicle as a whole makes it possible to eliminate errors in the calculation of correction coefficients, as well as to prevent the occurrence of failures during operation.

Keywords: technical, maintenance, repair, corrective, coefficients, transport, telematics, remote, diagnostics

For citation: Gurski A. S., Ivashko V.S. Using transport telematics and remote diagnostics to improve vehicle maintenance and repair. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 3, pp. 375–383 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-375-383>

Введение. В Республике Беларусь при проведении плановых технического обслуживания №1 (ТО-1), технического обслуживания №2 (ТО-2), текущего ремонта (ТР) и регламентированного ремонта (РР) широко применяется плано-предупредительная система технического обслуживания (ТО) и ремонта (Р) автомобильных транспортных средств (ТС). Коррективы в нормативные данные, установленные заводом-изготовителем, с учетом корректирующих коэффициентов для пробега до капитального ремонта (КР) или списания и трудоемкостей работ вносятся на основании Технического кодекса установившейся практики ТКП 248-2010 «Техническое обслуживание и ремонт автомобильных транспортных средств. Нормы и правила проведения».

Тенденции упрощения эксплуатации транспортных средств, повышения безопасности движения и экономической эффективности базируются на использовании интеллектуальных транспортных систем [1]. Первыми элементами стали применять системы дистанционного контроля расхода топлива и навигационные системы и технологии спутникового мониторинга транспорта (СМТ) [2]. Однако технологические аспекты по поддержанию транспортных средств в исправном состоянии с сохранением полного ресурса, заложенного заводом-изготовителем, требуют доработки.

В связи с тем что транспортное средство эксплуатируется в различных условиях, определение корректирующих коэффициентов имеет первостепенное значение, как и индивидуальный учет для конкретных транспортных средств.

Корректирующие коэффициенты зависят от различных условий:

коэффициент K_1 , учитывающий условия эксплуатации, зависит от скорости и нагрузки;

коэффициент K_2 учитывает модификацию ТС и организацию его работы;

коэффициент K_3 учитывает природно-климатические условия;

коэффициент K_4 учитывает пробег ТС с начала его эксплуатации;

коэффициент K_5 учитывает количественный состав транспортных средств, обслуживаемых и ремонтируемых в автотранспортном предприятии, и количество групп технологически совместимых ТС;

коэффициент K_6 учитывает период эксплуатации.

Применение данных коэффициентов вызывает определенные трудности, так как их значение варьируется в пределах 30 % и более, что позволяет транспортным предприятиям увеличивать пробеги до очередного технического обслуживания и уменьшать трудоемкость работ в ущерб состоянию транспортных средств и усложнению ремонтных работ. Объясняется это повышением эффективности использования транспортных средств в настоящий момент времени даже с учетом уменьшения ресурса.

Таким образом, целью данной работы является автоматизация учета общего пробега транспортного средства на весь период его эксплуатации на основе телематики транспортных средств и дистанционной диагностики.

Математическое обоснование принципа обработки данных транспортной телематики для расчета корректирующих коэффициентов. Для повышения качества ТО и Р и снижения общей трудоемкости работ, а также предотвращения сокращения установленного ресурса необходимо определить общий пробег транспортного средства до капитального ремонта ($L_{\text{КР}}$) (ТКП 248-2010) с учетом корректирующих коэффициентов:

$$L_{\text{КР}} = l_{\text{КР}} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3, \quad (1)$$

где $l_{\text{КР}}$ – нормативный пробег до капитального ремонта или списания, установленный заводом-изготовителем.

Трудоемкость текущего ремонта транспортного средства определяется с помощью следующего выражения:

$$N_{\text{ТР}} = n_{\text{ТР}} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6, \quad (2)$$

где $n_{\text{ТР}}$ – нормативная трудоемкость текущего ремонта, установленная заводом-изготовителем для базовой модели.

Коэффициент K_1 корректирует периодичность ТО, определяет пробег до КР или списания и трудоемкость ТР. В зависимости от условий эксплуатации периодичность технического обслуживания и трудоемкость текущего ремонта колеблется от 0,6 до 1, а пробег ТС до списания – 1,0–1,5 (ТКП 248-2010). Критерии для определения коэффициента включают качество дорожного покрытия и тип рельефа местности.

Если транспортное средство преодолевает длительные маршруты, которые проходят через несколько геозон с различными параметрами, то использование геолокации позволяет определить статус дороги, расположение над уровнем моря и расстояние от города.

Каждый маршрут транспортного средства индивидуален и состоит из интервалов движения, характеризующихся различными дорожными условиями, со специфическими режимами. В значительной степени отличаются условия эксплуатации автомобилей, работающих с заездом в карьер и при проезде пересеченной местности, в городах с интенсивным движением и частыми остановками. Коэффициент K_1 определяется по формуле

$$K_1 = K_{st} \cdot K_H \cdot K_l, \quad (3)$$

где K_{st} – коэффициент, учитывающий статус дороги; K_H – коэффициент, учитывающий расположение над уровнем моря; K_l – коэффициент, учитывающий расстояние от города.

Коэффициент K_{st} по координатам и условному обозначению на карте транспортной телематики определяется, по какому покрытию движется транспортное средство – по дороге или бездорожью, если по дороге – то к какой категории относится дорога (см. табл. П 1 ТКП 248-2010 и ТКП 45-3.03-19-2006 «Автомобильные дороги. Нормы проектирования»).

Детальное изучение коэффициента K_{st} показывает, что при его определении важным критерием является скоростной режим транспортного средства в соответствии с табл. 4 «Расчетные скорости движения для проектирования геометрических элементов дороги – плана, продольного и поперечного профилей» ТКП 45-3.03-19-2006. K_{st} может быть представлен следующим образом:

$$K_{st} = f(V(navi)), \quad (4)$$

где V – скорость движения транспортного средства, $navi$ – расположение транспортного средства в координатах карт навигации с характеристиками дорожного покрытия, характеристиками населенного пункта, определением дорожно-климатического районирования, определением высоты над уровнем моря [2].

Предложенная методика не в полной мере раскрывает скоростной режим, так как она предполагает теоретически необходимую скорость движения транспортного средства. Практическое измерение скорости движения транспортных средств имеет высокую достоверность и может производиться двумя способами. Одним из них является определение скорости по данным навигационной системы путем расчета пройденного пути в единицу времени. Первый способ имеет высокую точность, так как измеряет реальную скорость движения транспортного средства без

погрешностей от влияния потерь на проскальзывание колес, а также других факторов, таких как диаметр колес и степень накачки шин. Однако точность измерения им напрямую зависит от частоты считывания данных, что требует усложнения конструкции навигационной системы. Другой способ подразумевает считывание данных с датчика скорости, панели приборов или системы передачи данных. Этот способ имеет преимущество перед первым за счет простоты реализации и высокой точности получаемых результатов:

$$K_{st} = f(V(t)), \quad (5)$$

где t – элементарный временной интервал считывания данных.

В некоторых случаях рекомендуется использовать несколько способов определения скорости движения транспортного средства для получения большей точности. Если же учесть движение транспортного средства по пересеченной местности, то для более качественного описания дорожных условий кроме скорости движения следует учесть такие показатели, как частота вращения коленчатого вала ($n_{кв}$) и расход топлива (P_T).

На основании данных навигации рассчитывается коэффициент K_l , с учетом расстояния от города (а также с учетом населения города), по координатам населенных пунктов и условному обозначению на карте.

$$K_l = f(S(navi)R(navi)), \quad (6)$$

где S – расстояние от местоположения транспортного средства до населенного пункта, R – характеристика населенного пункта, по количеству жителей.

Принимая во внимание расположение при движении транспортного средства с учетом характеристик близко расположенного населенного пункта, для более корректного описания дорожных условий следует иметь в виду такие показатели, как скорость движения транспортного средства (V) и расход топлива (P_T). Данные параметры считываются с помощью системы транспортной телематики, что в полной мере может заместить картографические расчеты и получить большую точность:

$$K_l = f(V(t), P_T(t)). \quad (7)$$

Определение значения коэффициента K_H , учитывающего расположение транспортного средства над уровнем моря, производится по координатам высот геозон и условному обозначению на карте:

$$K_H = f(H(navi)), \quad (8)$$

где H – высота транспортного средства над уровнем моря.

При работе транспортных средств в высокогорных условиях происходит снижение мощности двигателя вследствие уменьшения коэффициента наполнения цилиндров. В результате средняя скорость движения грузовых автомобилей в горных условиях примерно на 40–50 % ниже, а расход топлива на 10–15 % выше, чем на равнинной местности.

Территория Республики Беларусь имеет преимущественно равнинную местность, поэтому изменение коэффициента K_H незначительно, что позволяет им пренебречь. Однако если транспортное средство преодолевает места с высоким расположением над уровнем моря, то учет данного коэффициента обязателен.

При преодолении возвышенностей более эффективными параметрами являются скорость движения транспортного средства (V) и расход топлива (P_T), считанные с помощью системы транспортной телематики, что в полной мере позволяет заместить картографические расчеты и получить большую точность:

$$K_H = f(V(t), P_T(t)). \quad (9)$$

С учетом использования системы транспортной телематики следует отметить, что применение классических составляющих коэффициента K_1 позволяет переписать выражение (3) следующим образом:

$$K_1 = f(f(V(navi)) \cdot f(H(navi)) \cdot f(S(navi)R(navi))). \quad (10)$$

Основным недостатком обработки данных в соответствии с формулой (10) является огромное количество зависимостей каждой точки навигационной системы, что требует больших ресурсов вычислительной системы. Данный способ рекомендуется применять для проверки адекватности расчетов, полученных другими способами. Альтернативным решением для повышения точности определения коэффициента K_1 является считывание параметров транспортной телематики. В общем виде формула будет выглядеть следующим образом:

$$K_1 = \frac{1}{T} \int_0^T (K_{st}(t) \cdot K_u(t) \cdot K_l(t)) dt, \quad (11)$$

где T – общий интервал времени эксплуатации транспортного средства от момента последнего технического воздействия; K_{st} – коэффициент, учитывающий статус дороги; K_u – коэффициент, учитывающий расположение над уровнем моря; K_l – коэффициент, учитывающий расстояние от города.

Наибольшую информативность дает привязка полученных результатов к параметрам, считываемым непосредственно с транспортных средств с определенным интервалом времени. Так как все составляющие коэффициенты в соответствии с формулами (5), (7), (9) включают скорость движения транспортного средства (V) и расход топлива (P_T), то результирующая формула преобразуется в следующий вид:

$$K_1 = f(V(t), P_T(t)). \quad (12)$$

Крутящий момент двигателя пропорционален расходу топлива, однако в соответствии с теорией движения транспортного средства расход топлива также зависит от скорости движения. В связи с этим для описания коэффициента, учитывающего условия эксплуатации, следует применить зависимости которые можно выразить системой

$$\begin{cases} K_1 = f(V(t), P_T(t)); \\ P_T = f(V(t)). \end{cases} \quad (13)$$

Данная система имеет сложную зависимость, и для ее реализации в идеальном случае необходимо применить трехмерный массив данных, который закладывается на основе экспериментальных исследований.

Таким образом, с учетом условий эксплуатации коэффициент K_1 будет определяться путем считывания данных с заданным интервалом с последующим вычислением среднего значения, после чего с этим же интервалом корректируются нормативные значения.

При установлении нагрузки используются параметры мгновенного или среднего расхода топлива, которые можно определять с использованием датчиков расхода топлива и уровня топлива, а также данных длительности впрыска топлива форсунками и результатами промежуточных расчетов в CAN-шине передачи данных транспортного средства [7]:

$$P_T = f(t_{inj}(t)), \quad (14)$$

где t_{inj} – длительность впрыска топлива [6].

Коэффициент K_2 учитывает модификацию транспортных средств и организацию работы и используется для определения пробега до КР (списания), трудоемкости ТО, моечных работ и ТР:

$$K_2 = K_M \cdot K_{ОР}, \quad (15)$$

где K_M – коэффициент, учитывающий модификацию транспортного средства; $K_{ОР}$ – коэффициент, учитывающий организацию работы транспортного средства.

Коэффициент K_M определяется по параметрам, установленным заводом-изготовителем, и функциональному назначению, и может быть введен в ручном режиме в систему расчета или в автоматическом – по идентификационному номеру транспортного средства (VIN):

$$K_M = f(VIN). \quad (16)$$

Определение коэффициента, учитывающего организацию работы транспортного средства, производится путем измерения таких параметров, как частота вращения коленчатого вала, расход топлива и нагрузка на ось:

$$K_{OP} = K_{nkV} \cdot K_P \cdot K_g, \quad (17)$$

где K_{nkV} – коэффициент, учитывающий частоту вращения коленчатого вала; K_P – коэффициент, учитывающий расход топлива; K_g – коэффициент, учитывающий нагрузку на ось. Данные коэффициенты определяются по формулам:

$$K_{nkV} = f(n_{KB}(t)), \quad (18)$$

где n_{KB} – частота вращения коленчатого вала;

$$K_P = f(P_T(t)), \quad (19)$$

$$K_g = f(N(t)), \quad (20)$$

где N – нагрузка на ось транспортного средства.

Таким образом,

$$K_{OP} = f(n_{KB}(t), P_T(t), N(t)) \quad (21)$$

На основании формулы (15) получаем:

$$K_2 = f(VIN) \cdot f(n_{KB}(t), P_T(t), N(t)). \quad (22)$$

Расчет K_2 производится с тем же интервалом что и K_1 , после чего производится корректировка нормативных данных.

Коэффициент K_3 учитывает природно-климатические условия, главным из которых является температурный режим.

Применение геолокации с привязкой к местности в транспортной телематике позволяет корректировать с большей точностью коэффициент в соответствии с таблицей «Дорожно-климатическое районирование территории Республики Беларусь» приложения А ТКП 45-3.03-19-2006 в соответствии с формулой

$$K_3 = f(T_B(navi)), \quad (23)$$

где T_B – температура воздуха.

Коэффициент K_3 применяется для корректирования периодичности ТО, пробега до КР, трудоемкости ТР. Использование датчика температуры воздуха, поступающего в цилиндры двигателя, или датчика наружного воздуха позволяет фиксировать температурные режимы и критерии природных условий:

$$K_3 = f(T_B(t)). \quad (24)$$

Датчик определяет температуру окружающего воздуха и в виде напряжения подает сигнал в блок управления следующим образом:

$$T_B = f(U_{СМВ}), \quad (25)$$

где $U_{СМВ}$ – выходное напряжение, снимаемое с датчика температуры воздуха, В.

Коэффициент K_4 учитывает пробег с начала эксплуатации и применяется для корректировки трудоемкости ТО и ТР, а также продолжительности простоя в ТО и ремонте. Данные о пробеге считываются из блока управления кузовом или с панели приборов. При необходимости можно повысить точность данного коэффициента путем фиксации наработки двигателя внутреннего сгорания с использованием моточасов, что имеет актуальность для специализированной техники. Коэффициент определяется согласно выражению

$$K_4 = f(L(t)), \quad (26)$$

где L – пробег с начала эксплуатации, км.

Коэффициент K_5 учитывает количественный состав транспортных средств, обслуживаемых и ремонтируемых в автотранспортном предприятии, и количество групп технологически совместимых транспортных средств. Применяется для корректировки трудоемкости технического обслуживания, текущего ремонта и моечных работ. Коэффициент определяется по данным базы технической службы, может быть введен в систему расчета по мере изменения количественного состава или количества технологически совместимых групп и рассчитывается следующим образом:

$$K_5 = K_A \cdot K_G, \quad (27)$$

где K_A – коэффициент, учитывающий количественный состав транспортных средств; K_G – коэффициент, учитывающий количество технологически совместимых групп. Данные коэффициенты определяются по формулам:

$$K_A = f(A(t)), \quad (28)$$

где A – количественный состав транспортных средств;

$$K_G = f(G(t)), \quad (29)$$

где G – количество технологически совместимых групп.

Подставив (28) и (29) в выражение (27), получаем

$$K_5 = f(A(t)) \cdot f(G(t)). \quad (30)$$

Коэффициент K_6 учитывает период эксплуатации и предназначен для корректировки трудоемкости технического обслуживания, текущего ремонта и моечных работ. Период эксплуатации устанавливается по времени и дате со спутников. Более точно рассчитать данный коэффициент можно, используя температурный режим эксплуатации, то есть по принципу определения коэффициента K_3 . В данном случае информацию с датчика температуры воздуха следует принимать в усредненном режиме. Детальная запись условий эксплуатации позволит значительно сократить затраты на техническое обслуживание и ремонт.

$$K_6 = f(T_B(t)). \quad (31)$$

Результаты математического обоснования принципа обработки данных транспортной телематики. Результирующий коэффициент корректирования нормативов получается перемножением отдельных коэффициентов [1]. Перечень расчетных параметров определяется по группе формул:

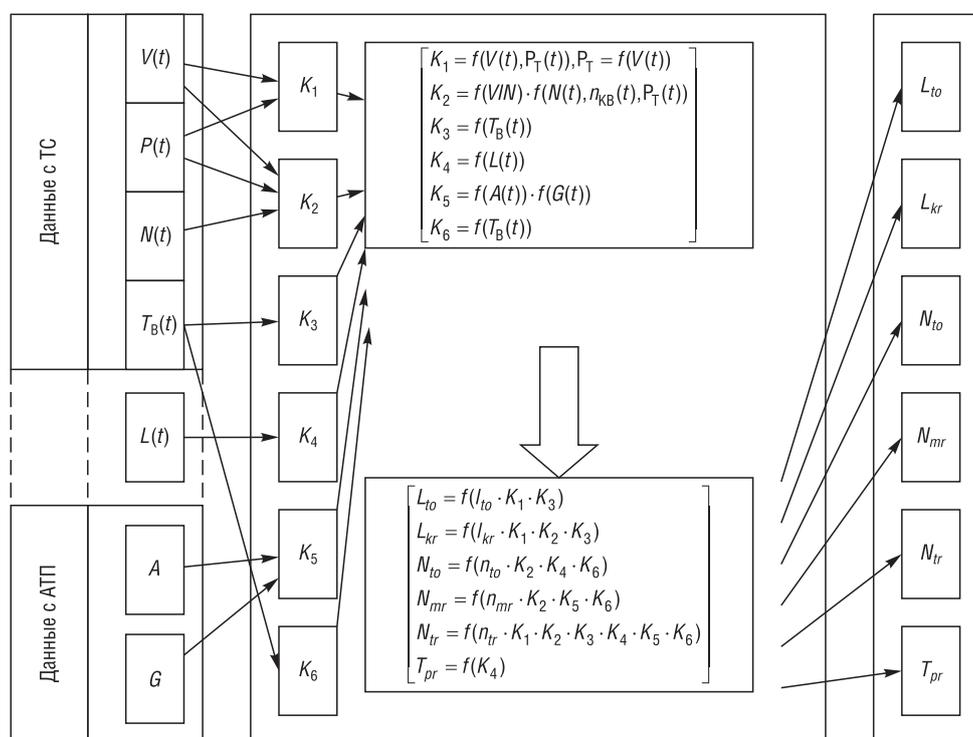
$$\left[\begin{array}{l} L_{to} = f(l_{to} \cdot K_1 \cdot K_3) \\ L_{kr} = f(l_{kr} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3) \\ N_{to} = f(n_{to} \cdot K_2 \cdot K_4 \cdot K_6) \\ N_{mr} = f(n_{mr} \cdot K_2 \cdot K_5 \cdot K_6) \\ N_{tr} = f(n_{tr} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6) \\ T_{pr} = f(K_4) \end{array} \right]. \quad (32)$$

Перечень коэффициентов корректирования нормативов получается путем обработки входных параметров:

$$\left[\begin{array}{l} K_1 = f(V(t), P_T(t)), P_T = f(V(t)) \\ K_2 = f(VIN) \cdot f(n_{KB}(t), P_T(t), N(t)) \\ K_3 = f(T_B(t)) \\ K_4 = f(L(t)) \\ K_5 = f(A(t)) \cdot f(G(t)) \\ K_6 = f(T_B(t)) \end{array} \right]. \quad (33)$$

С целью реализации заложенных принципов предлагается блок-схема обработки данных транспортной телематики для расчета корректирующих коэффициентов с последующим опреде-

лением периодичностей и трудоемкостей (рисунок). Данная блок-схема подразумевает реализацию стандартной системой транспортной телематики транспортного средства, однако возможна модернизация с возможностью дистанционной диагностики, позволяющей выполнять функции общей диагностики отдельных систем и транспортного средства в целом.



Блок-схема обработки данных
Data flowchart

Выводы. Система телематики транспортных средств и дистанционной диагностики позволяет автоматизировать получение корректирующих коэффициентов для определения значений периодичностей и трудоемкостей технического обслуживания и ремонта, пробега до капитального ремонта или списания транспортного средства, а также производить расчеты с приемлемой для прикладного применения точностью.

Предложенное математическое обоснование принципа обработки данных транспортной телематики дает возможность развить новый подход к расчету пробегов до технических воздействий и корректировать нормативы трудоемкостей выполнения данных операций.

Использование средств навигации делает возможным подтверждение использования эксплуатационных параметров на этапе экспериментальных исследований путем определения расположения транспортного средства в координатах карт навигации с характеристиками дорожного покрытия и населенного пункта, с определением высоты над уровнем моря и дорожно-климатического районирования.

Предложенная блок-схема обработки данных является основанием для создания алгоритма, позволяющего автоматизировать считывание данных с транспортного средства для последующего определения значений периодичностей и трудоемкостей технического обслуживания и ремонта, пробега до капитального ремонта или списания.

Список использованных источников

1. Интеграция технической эксплуатации автомобилей в структуры и процессы ITS / В.П. Волков [и др.]. – Донецк: Ноулидж, 2013. – 398 с.
2. Мальцев, Н.Г. Современные методы контроля расхода топлива и применение для мониторинга режимов работы автотракторной техники / Н.Г. Мальцев, Ю.Д. Карпиевич // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. ведущим ученым БГАТУ, создателям

научной школы по автотракторостроению Д. А. Чудакову, В. А. Скотникову, Минск, 28–30 нояб. 2013 г. – Минск: БГАТУ, 2013. – С. 35–39.

3. Ивашко, В. С. Показатели эффективности использования транспортных средств / В. С. Ивашко, А. С. Гурский, А. Н. Мальцев // *Изобретатель*. – 2017. – № 10 (214). – С. 26–30.

4. Разработка норм расхода топлива [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://tehtonon.by/?page_id=464 – Дата доступа: 14.03.2020.

5. Повышение качества технического обслуживания и ремонта автотранспортных средств путем мониторинга технического состояния / А. А. Алешко [и др.]; под ред. Д. Н. Ковалёва. – Минск: Бел НИИТ «Транстехника», 2018. – 324 с.

6. Гурский, А. С. Диагностирование электронной системы впрыска топлива бензинового двигателя по длительности открытого состояния форсунок / А. С. Гурский // *Вестн. Белорус. нац. техн. ун-та*. – 2003. – № 4. – С. 49–52.

References

1. Volkov V. P., Mateichik V. P., Nikonov O. Ya., Komov P. B., Gritsuk I. V., Volkov Yu. V., Komov E. A. *Integration of the Technical Operation of Cars in the Structures and Processes of ITS*. Donetsk, Noulidzh Publ., 2013. 398 p. (in Russian).

2. Mal'cev N. G., Karpievich Yu. D. Modern methods of fuel consumption control and application for monitoring operating modes of automotive equipment. *Nauchno-tekhnicheskii progress v sel'skokhozyaistvennom proizvodstve: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi vedushchim uchenym BGATU, sozdatelyam nauchnoi shkoly po avtotraktorostroeniyu D. A. Chudakovu, V. A. Skotnikovu, Minsk, 28–30 noyabrya 2013 g.* [Scientific and Technological Progress in Agricultural Production: Materials of the International Scientific and Practical Conference Dedicated to the Leading Scientists of the BSATU, the Founders of the Scientific School on Automotive Engineering D. A. Chudakov, V. A. Skotnikov, Minsk, November 28–30, 2013]. Minsk, BSATU, 2013, pp. 35–39 (in Russian).

3. Ivashko V. S., Gurskii A. S., Mal'cev A. N. Performance indicators for the use of vehicles. *Izobretatel'* [Inventor], 2017, no. 10 (214), pp. 26–30 (in Russian).

4. *Development of fuel consumption standards*. Available at: http://tehtonon.by/?page_id=464 (accessed 14 March 2020) (in Russian).

5. Aleshko A. A., Gurskii A. S., Ivashko V. S., Koval' D. N. *Improving the Quality of Maintenance and Repair of Vehicles by Monitoring the Technical Condition*. Minsk: Bel NIIT "Transtehnika", 2018. 324 p. (in Russian).

6. Gurskii A. S. Diagnosing the electronic fuel injection system of a gasoline engine by the duration of the open state of the injectors. *Vestnik Belorusskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Belarusian National Technical University], 2003, no. 4, pp. 49–52 (in Russian).

Информация об авторах

Гурский Александр Станиславович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Техническая эксплуатация автомобилей», Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ASGURSKI@bntu.by. <https://orcid.org/0000-0002-3904-8146>

Ивашко Виктор Сергеевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Техническая эксплуатация автомобилей», Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ivashko47@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0003-1905-1898>

Information about the authors

Alexander S. Gurski – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department "Technical Operation of Automobiles", Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ASGURSKI@bntu.by. <https://orcid.org/0000-0002-3904-8146>

Viktor S. Ivashko – D. Sc. (Engineering), Professor, Professor of the Department "Technical Operation of Automobiles", Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ivashko47@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0003-1905-1898>

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

I. Статьи о результатах работ, проведенных в научных учреждениях, должны иметь разрешение на опубликование (сопроводительное письмо ректората или дирекции соответствующего института либо выписку из протокола заседания ученого совета, отдела или кафедры, а также акт экспертизы).

II. Статья предоставляется в редакцию в двух экземплярах на белорусском, русском или английском языках; шрифт – Times New Roman, кегль – 11 (в том числе в формулах); межстрочный интервал – 1,5. Занумерованные формулы выключаются в отдельную строку. В тексте не допускаются рукописные вставки и вклейки. Статья должна быть подписана всеми авторами.

III. Статья должна иметь следующую структуру:

1. Индекс по Универсальной десятичной классификации (УДК); инициалы и фамилии авторов; полное наименование учреждений, где работают авторы, с указанием города и страны, название статьи.

2. Аннотация (авторское резюме) объемом 150–250 слов должна кратко представлять результаты работы и быть понятной, в том числе и в отрыве от основного текста статьи; быть информативной, хорошо структурированной (один из вариантов написания аннотации – краткое повторение структуры статьи, включающее введение, цели и задачи, методы, результаты, заключение или выводы).

3. Ключевые слова – набор слов, отражающих содержание текста в терминах объекта, научной отрасли и методов исследования; рекомендуемое количество ключевых слов 5–10.

4. Метатекстовые данные (все то, что предшествует основному тексту статьи) приводятся *на английском языке*, причем аннотация должна быть оригинальной (т. е. не являться дословным переводом русскоязычной аннотации). Если статья англоязычная – вышеуказанные данные приводятся на русском (белорусском) языке.

5. Основной текст статьи не должен превышать 16 с. (т. е. около 40 тыс. знаков); в этот объем также входят таблицы и рисунки (до 7–8). Материал должен быть четко структурированным: введение, цели и задачи, методы, результаты, заключение (выводы). В русско- и белорусскоязычных статьях рекомендуется делать подрисуночные подписи и надписи на самих иллюстрациях на двух языках – *русском (белорусском) и английском*.

6. Список использованной литературы (не более 40 ссылок) оформляется в соответствии с требованиями Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь (ГОСТ 7.1-2003). Цитируемая литература приводится общим списком по мере упоминания, ссылки в тексте даются порядковым номером в квадратных скобках (напр., [1]); ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

7. Список цитированных источников приводится *в романском алфавите* (латиница) – «References» – со следующей структурой: авторы (транслитерация), название статьи в транслитерированном варианте [перевод названия статьи на английский язык в квадратных скобках],

название русскоязычного источника (транслитерация) [перевод названия источника на английский язык – парафраз (для журналов можно не делать)], выходные данные с обозначениями на английском языке.

8. Если присутствует информация о финансировании (поддержке грантами проектов и т. п.), ее следует давать на русском (белорусском) и английском языках под заголовком «Благодарности» («Падзякі», «Acknowledgements»).

IV. Для подготовки метаданных (так называемый информационный лист) на отдельной странице следует указать *на русском (белорусском) и английском языках* для каждого автора: фамилию, имя и отчество (полностью), ученую степень, звание, должность, место работы с указанием адреса, контактную информацию (e-mail, ORCID, телефоны).

V. Электронный вариант статьи предоставляется на диске, флэшке, присылается по электронной почте в редакцию журнала – ftvesti@mail.ru, загружается на сайт журнала (vestift.belnauka.by). Текст должен быть набран в Word под Windows, формулы – в редакторе MathType. Собственным редактором формул версий Microsoft Office 2007 и выше пользоваться нельзя, так как в редакционно-издательском процессе он не поддерживается. Вставку символов выполнять через меню «Вставка\Символ». Выключку вверх и вниз (C^2 , C_4) выполнять через меню «Формат\Шрифт\Верхний индекс», «Формат\Шрифт\Нижний индекс». Латинские буквы необходимо набирать *курсивом*, греческие – прямо (для набора греческих символов следует пользоваться гарнитурой Symbol). Обозначения математических функций (lim, sup, ln, sin, Re, Im и т. п.), символы химических элементов (N, Cl) также набираются прямым шрифтом.

VI. Черно-белые и цветные рисунки вставляются в текст статьи (Word), а также даются в виде отдельных файлов в формате tif (600 точек на дюйм). Желательно также предоставлять их в формате оригинала (Corel, диаграммы в Excel, Origin Pro и т. д.), т. е. в той программе, в которой они выполнены. Текст на рисунках набирается основной гарнитурой, причем начертание символов (греческое, латинское) должно соответствовать их начертанию в тексте. Размер кегля соизмерим с размером рисунка (желательно 8 пунктов). На обороте рисунков (если они даются отдельно) указываются фамилии авторов, название статьи. Фотографии предоставляются в виде файлов (tif, jpg, png, eps) и в распечатанном виде.

VII. Поступившая в редакцию статья направляется на рецензию, затем визируется членом редколлегии. Основным критерием целесообразности публикации является новизна и информативность статьи. Если по рекомендации рецензента статья возвращается автору на доработку, то переработанная рукопись вновь рассматривается редколлегией. Статьи не по профилю журнала возвращаются авторам после заключения редколлегии. Оформленные не по правилам статьи редакцией не принимаются.

Материалы для публикации следует направлять по адресу:
ул. Академическая, 1, к. 118, редакция журнала «Весці НАН Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук»,
220072, г. Минск, Республика Беларусь, телефон для справок: +375 17 374 02 45, либо по электронной почте: ftvesti@mail.ru,
либо через онлайн-форму на сайте vestift.belnauka.by.