

# Вестник БарГУ

Научно-практический журнал

Издаётся с марта 2013 года  
Выходит 2 раза в год

№ 1 (19), апрель, 2026

Серия «Технические науки»

Учредитель: учреждение образования  
«Барановичский государственный университет».

Адрес редакции:  
ул. Войкова, 21, 225404 г. Барановичи.  
Телефон: +375 (163) 64 34 77.  
E-mail: vestnikbargu@gmail.com .

Подписные индексы: 00999 — для индивидуальных подписчиков; 009992 — для организаций.  
Свидетельство о регистрации средств массовой информации № 1533 от 30.07.2012, выданное Министерством информации Республики Беларусь.

В соответствии с приказом Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь от 21 января 2015 г. № 16 научно-практический журнал «Вестник БарГУ» серия «Технические науки» включён в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим наукам.

Научно-практический журнал «Вестник БарГУ» включен в РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), лицензионный договор № 06-01/2016.

Выходит на русском и английском языках.  
Распространяется на территории Республики Беларусь.

Заведующий редакционно-издательской группой А. Ю. Сидоренко  
Технический редактор Ю. А. Киселева  
Компьютерная вёрстка С. М. Глушак  
Корректор Н. Н. Колодко

Подписано в печать 27.04.2026. Формат 60 × 84 1/8.  
Бумага офсетная. Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 10.00. Уч.-изд. л. 5,70.  
Тираж 35 экз. Заказ . Цена свободная.

Полиграфическое исполнение: республиканское унитарное предприятие «Информационно-вычислительный центр Министерства финансов Республики Беларусь». Специальное разрешение (лицензия) на право осуществления полиграфической деятельности № 02330/89 от 3 марта 2014 года.  
Адрес: ул. Кальварийская, 17, 220004 г. Минск.

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

**Кочурко В. И.** (гл. ред. журн.), доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик Белорусской инженерной академии, академик Международной академии технического образования, академик Международной академии наук педагогического образования, академик Академии экономических наук Украины, заслуженный работник образования Республики Беларусь, профессор кафедры технического обеспечения сельскохозяйственного производства и агрономии (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

**Климук В. В.** (зам. гл. ред. журн.), кандидат экономических наук, доцент, первый проректор (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

**Сотник Л. Л.** (гл. ред. сер.), кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

**Горбач Ю. Е.** (отв. секретарь сер.) (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

**Зубрицкая Л. С.** (ред. текстов на англ. яз.) (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

**Богданович И. А.** (отв. за направление «Машиностроение и машиноведение»), кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь); **Дубень И. В.** (отв. за направление «Процессы и машины агроинженерных систем»), кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

**Анискович Г. И.**, кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет», Минск, Республика Беларусь);

**Белый А. В.**, академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор (государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», Минск, Республика Беларусь); **Девойно О. Г.**, доктор технических наук, профессор, заведующий научно-исследовательской инновационной лабораторией плазменных и лазерных технологий (филиал Белорусского национального технического университета «Научно-исследовательская часть», Минск, Республика Беларусь);

**Дремук В. А.**, кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь);

**Жигалов А. Н.**, доктор технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь);

государственное научное учреждение «Институт технологии металлов Национальной академии наук Беларуси», Могилев, Республика Беларусь); **Калугин Ю. К.**, кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Гродно, Республика Беларусь); **Карташевич А. Н.**,

доктор технических наук, профессор (учреждение образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия», Горки, Республика Беларусь); **Клубович В. В.**,

академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор (государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», Минск, Республика Беларусь); **Сиваченко Л. А.**, доктор

технических наук, профессор (межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», Могилев, Республика Беларусь); **Томило В. А.**, доктор технических наук, профессор (Белорусский

национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь); **Шелег В. К.**, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь).

Promoter: Institution of Education "Baranavichy State University".

*Editorial address:*

21 Voykova Str., 225404 Baranavichy.  
Phone: +375 (163) 64 34 77.  
E-mail: vestnikbargu@gmail.com .

Subscription indices: 00999 — for individual subscribers;  
009992 — for companies.

The certificate of the registration of mass media № 1533  
of 30.07.2012 issued by the Ministry of Information  
of Belarus.

*In compliance with the order of the Higher Attestation  
Commission of the Republic of Belarus from January 21,  
2015 № 16 the scientific and practical journal "BarSU  
Herald. Engineering Series" is included into the List of  
scientific publications of the Republic of Belarus for  
publishing the results of theses research on engineering  
sciences (mechanical engineering and machines,  
processes and machines of agroengineering systems).*

*Scientific-and-practical journal "BarSU Herald"  
is included into RSCI (Russian Science Citation Index),  
license agreement № 06-01/2016.*

Issued in Russian and English. The journal is distributed  
on the territory of the Republic of Belarus.

Managing editor A. Y. Sidorenko  
Technical editor Y. A. Kiseleva  
Desktop Publishing S. M. Glushak  
Proofreader N. N. Kolodko

Signed print 27.04.2026. Format 60 × 84 1/8. Paper xerox.  
Digital printing. Headset Times. Conv. pr. s. l. 10,00.  
Acc.-pub. s. l. 5,70. Circulation of 35 copies.  
Order . Free price.

Printing performance: Republican Unitary Enterprise  
"Information and Computing Center of the Ministry of  
Finance of the Republic of Belarus". Special permission  
(license) for the right to carry out printing activities  
No. 02330/89, March 3, 2014.  
Address: 17 Kalvaryiskaya, 220004 Minsk

**EDITORIAL BOARD**

**Kochurko V. I.** (*editor-in-chief*), DSc in Agriculture, Professor, Academician of the Belarusian Academy of Engineering, Academician of the International Academy of Technical Education, academician of the International Academy of Pedagogical Education, Academician of the Academy of Economic Sciences of Ukraine, Honored Worker of Education of the Republic of Belarus, Professor of Department of Technical Support of Agricultural Production Processes and Agronomic Sciences (Institution of Education "Baranavichy State University", Baranavichy, the Republic of Belarus).

**Klimuk V. V.** (*deputy editor-in-chief*), PhD in Economics, Associate Professor, first vice-rector (Institution of Education "Baranavichy State University", Baranavichy, the Republic of Belarus).

**Sotnik L. L.** (*the series editor-in-chief*), PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Institution of Education "Baranavichy State University", Baranavichy, the Republic of Belarus).

**Gorbach Yu. E.** (*responsible for the topic area "Engineering Sciences"*) (Institution of Education "Baranavichy State University", Baranavichy, the Republic of Belarus).

**Zubritskaya L. S.** (*ed. of texts in English*) (Institution of Education "Baranavichy State University", Baranavichy, the Republic of Belarus).

**Bogdanovich I. A.** (*responsible for the area "Mechanical Engineering and Machine Science"*), PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Institution of Education "Baranavichy State University", Baranavichy, the Republic of Belarus); **Duben I. V.** (*responsible for the area "Processes and Machines of Agro engineering Systems"*), PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Institution of Education "Baranavichy State University", Baranavichy, the Republic of Belarus).

**Aniskovich G. I.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational Institution "Belarusian State Agrarian Technical University", Minsk, the Republic of Belarus); **Bely A. V.**, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, DSc in Technical Sciences, Professor (State Scientific Institution "Institute of Physics and Technology of the National Academy of Sciences of Belarus", Minsk, the Republic of Belarus); **Devoino O. G.**, DSc in Technical Sciences, Professor, Head of the Innovative Research Laboratory of Plasma and Laser Technologies (branch of the Belarusian National Technical University "Research Unit", Minsk, the Republic of Belarus); **Dremuk V. A.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Institution of Education "Baranavichy State University", Baranavichy, the Republic of Belarus); **Zhigalov A. N.**, DSc in Technical Sciences, Associate Professor (Institution of Education "Baranavichy State University", Baranavichy, the Republic of Belarus; State scientific institution "Institute of Metal Technology of the National Academy of Sciences of Belarus", Mogilev, the Republic of Belarus); **Kalugin Yu. K.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational Institution "Yanka Kupala Grodno State University", Grodno, the Republic of Belarus); **Kartashevich A. N.**, DSc in Technical Sciences, Professor (Educational Institution "Belarusian State of the Orders of the October Revolution and Labor Red Banner Agricultural Academy", Gorki, the Republic of Belarus); **Klochkov A. V.**, DSc in Technical Sciences, Professor (Educational Institution "Belarusian State of the Orders of the October Revolution and Labor Red Banner Agricultural Academy", Gorki, the Republic of Belarus); **Klubovich V. V.**, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, DSc in Technical Sciences, Professor (State Scientific Institution "Institute of Physics and Technology of the National Academy of Sciences of Belarus", Minsk, the Republic of Belarus); **Sivachenko L. A.**, DSc in Technical Sciences, Professor (Interstate Educational Institution of Higher Education "Belarusian-Russian University", Mogilev, the Republic of Belarus); **Tomilo V. A.**, DSc in Technical Sciences, Professor (Belarusian National Technical University, Minsk, the Republic of Belarus); **Sheleg V. K.**, A. M. of the National Academy of Sciences of Belarus, DSc in Technical Sciences, Professor (Belarusian National Technical University, Minsk, the Republic of Belarus).

## МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

**Дубень И. В., Нерода С. М., Ционенко Д. А., Борисюк А. К.** Система дистанционного регулирования температуры для инфракрасного обогрева помещений и оборудования

**Жигалов А. Н., Горавский И. А.** Исследования амплитудно-частотных характеристик при аэродинамической звуковой обработке быстрорежущей стали Р6М5

**Князев К. Н., Клочков В. Н., Подымако М. Э.** Моделирование динамических процессов лифта с использованием программной системы виртуального моделирования Adams

**Котов А. В., Кроль Д. Г.** Оптимизационный синтез плоских рычажных механизмов по углу давления

**Матяс А. Н.** Моделирование напряженно-деформированного состояния стали 40Х13 и сплава ВТ6 при магнитно-импульсном воздействии

**Овчинников Е. В., Веремейчик А. И., Линник Д. А., Парфиевич А. Н., Нерода М. В., Проволенок А. В., Кузнецов Е. В., Лях С. О.** Влияние малослойного графена на поверхностные характеристики композиционных полиэфирных покрытий

**Сотник Л. Л., Богданович И. А., Малевич А. В., Малеронюк В. В.** Перспективы разработки методов повышения эксплуатационных характеристик деталей машин и режущих инструментов комбинированным воздействием

**Чаевский В. В., Белый А. В., Рудак О. Г.** Покрытия на основе TiAlN как перспективные системы для дерево-режущего инструмента

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ  
АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

**Бурдейко В. А.** Расчет кинематических параметров конической щетки для очесывания колорадского жука

**Крупенин П. Ю., Китун А. В.** Аналитическое описание геометрического профиля проточной части ротора самовсасывающего гидродинамического аппарата

## MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

**4 Duben I. V., Neroda S. M., Tsionenko D. A., Borisyuk A. K.** Remote temperature control system for infrared heating of premises and equipment

**13 Jigalov A. N., Goravskii I. A.** Research of amplitude-frequency characteristics in aerodynamic sound treatment of R6M5 high-speed steel

**21 Kniazev K. N., Klochkov V. N., Podymako M. E.** Simulation of elevator dynamic processes using the Adams virtual modeling system

**33 Kotov A. V., Krol D. G.** Optimization synthesis of flat lever mechanisms by pressure angle

**40 Matsias A. N.** Modeling of the stress-strain state of 40X13 steel and VT6 alloy under magnetic-impulse influence

**48 Ovchinnikov E. V., Veremeychik A. I., Linnik D. A., Parfievich A. N., Niaroda M. V., Provolenok A. V., Kuznetsov E. V., Lyakh S. O.** Effect of low-layer graphene on the surface characteristics of composite polyester coatings

**58 Sotnik L. L., Bogdanovich I. A., Malevich A. V., Maleronok V. V.** Prospects for developing methods to improve the operational characteristics of machine parts and cutting tools through combined influence

**65 Chayevski V. V., Byeli A. V., Rudak O. G.** TiAlN-based coatings as promising systems for wood-cutting tools

PROCESSES AND MACHINES  
OF AGROENGINEERING SYSTEMS

**71 Burdeyko V. A.** Calculation of kinematic parameters of a conical brush for harvesting colorado potato beetle

**77 Krupenin P. Y., Kitun A. V.** Analytical description of the geometric profile of the rotor flowing part of a self-priming hydrodynamic apparatus

## MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

УДК 621.365.832:681.536

**И. В. Дубень<sup>1</sup>**, кандидат технических наук, доцент, **С. М. Нерода<sup>2</sup>**,  
**Д. А. Ционенко<sup>3</sup>**, кандидат физико-математических наук, доцент,  
**А. К. Борисюк<sup>4</sup>**

<sup>1, 2</sup>Учреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Парковая, 62,  
225401 Барановичи, Республики Беларусь, <sup>1</sup>duben\_i\_v@mail.ru, <sup>2</sup>nerodastanislav@mail.ru

<sup>3</sup>Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»,  
ул. П. Бровки, 6, 220013 Минск, Республика Беларусь, tsionenko70@mail.ru

<sup>4</sup>Общество с дополнительной ответственностью «Евролиния», пер. Козлова, 7А, 220037 Минск,  
Республика Беларусь, qsun@eurolinia.by

### СИСТЕМА ДИСТАНЦИОННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЛЯ ИНФРАКРАСНОГО ОБОГРЕВА ПОМЕЩЕНИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ

Для обогрева производственных помещений и оборудования на машиностроительных предприятиях в ряде случаев целесообразно использовать системы инфракрасного обогрева. Размещение обогревателей обусловлено размерами и особенностями помещения, требованиями технологии производства и санитарных норм. Обогреватели могут быть закреплены на высоте 2...7 м на стенах или потолке помещения. Автоматическое регулирование в системах обогрева зданий и сооружений способно обеспечить значительную экономию энергии, поэтому актуальной является разработка системы дистанционного управления инфракрасными нагревательными устройствами.

Разработана и испытана система дистанционного регулирования мощности инфракрасных нагревателей для обеспечения требуемого режима обогрева. Система состоит из модулей датчика температуры, регулятора мощности и модуля сервера с микроконтроллерами ESP, передача данных между которыми производится с помощью беспроводного интерфейса ESP NOW. Программное обеспечение включает также веб-сервер для управления системой по Wi-Fi со смартфона или ноутбука. Доступно ручное управление мощностью нагревателей и автоматическое регулирование температуры на основе двухпозиционного релейного регулятора или регулятора на основе нечеткой логики.

Выполнен анализ работы релейного и нечеткого регуляторов в переходном и установившемся режимах, определены условия применения системы в производственных условиях и перспективы ее использования для автоматизации процессов в машиностроительном производстве.

**Ключевые слова:** нагреватель; инфракрасный нагрев; регулирование температуры; нечеткое регулирование; релейное регулирование; автоматизация; дистанционное управление; датчик температуры.

Рис. 7. Табл. 2. Библиогр.: 11 назв.

**I. V. Duben<sup>1</sup>**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, **S. M. Neroda<sup>2</sup>**,  
**D. A. Tsionenko<sup>3</sup>**, PhD in Physics and Mathematics Sciences, Associate Professor,  
**A. K. Borisjuk<sup>4</sup>**

<sup>1, 2</sup>Institution of Education "Baranavichy State University", 62 Parkovaya Str, 225401 Baranavichy,  
the Republic of Belarus, <sup>1</sup>duben\_i\_v@mail.ru, <sup>2</sup>nerodastanislav@mail.ru

<sup>3</sup>Institution of Education "Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics", 6 P. Brovki Str.,  
220013 Minsk, the Republic of Belarus, tsionenko70@mail.ru

<sup>4</sup>ALC "Eurolinia", 7A Kozlova Lane, 220037 Minsk, the Republic of Belarus, qsun@eurolinia.by

### REMOTE TEMPERATURE CONTROL SYSTEM FOR INFRARED HEATING OF PREMISES AND EQUIPMENT

For heating production facilities and equipment at engineering enterprises, it is advisable to use infrared (IR) heating systems in some cases. The size and specific features of the premises, production technology requirements, and sanitary standards determine the placement of heaters. Heaters can be mounted at a height of 2...7 m on walls or the

ceiling of the premises. Automatic control in building and structure heating systems can provide significant energy savings; therefore, the remote control system development for infrared heating devices is highly relevant.

A system for remote regulation of IR heater power to ensure the required heating mode has been developed and tested. The system consists of temperature sensor modules, a power regulator, and a server module with ESP microcontrollers; data exchange between them is carried out via the wireless ESP NOW interface. The software also includes a web server for system control via Wi-Fi from a smartphone or laptop. Both manual control of heater power and automatic temperature regulation based on a two-position relay controller or a fuzzy logic controller are available.

An analysis of the relay operation and fuzzy controllers in transient and steady-state modes has been performed. The conditions for system application in industrial environments and the prospects for its use in automating processes in machine-building production have been determined.

**Key words:** heater; infrared heating; temperature control; fuzzy control; relay control; automation; remote control; temperature sensor.

Fig. 7. Table 2. Ref.: 11 titles.

**Введение.** Системы инфракрасного (далее — ИК) обогрева производственных и бытовых помещений, в отличие от водяных, воздушных и других систем, характеризуются прямой передачей энергии нагреваемой поверхности в облучаемой зоне. При установленном режиме работы распределение температур в помещении (нагреваемых поверхностей и окружающего воздуха) определяется процессами молекулярного теплообмена, естественной и принудительной конвекции. Инфракрасные обогреватели подходят для помещений с высокими потолками, так как тепловое излучение позволяет нагревать поверхности в облучаемой зоне, минимизируя аккумуляцию тепловой энергии под потолком. Системы ИК-обогрева рекомендуется использовать для локального обогрева рабочих мест, оборудования и производственных зон в полуоткрытых и открытых помещениях, а также на открытом воздухе, где применение других видов обогрева невозможно или малоэффективно [1].

Инфракрасный обогрев в производственных цехах машиностроительных производств, в отличие от бытовых помещений, характеризуется:

- относительно большой единичной мощностью ИК-обогревателей, которая составляет 6 кВт у подвесных обогревателей Vallu VİN-T-6.0 [2] и 9 кВт у обогревательных панелей модели ЭИП-С133 [3];

- значительными размерами помещений и, как следствие, большим расстоянием между обогревателями и объектами нагрева;

- необходимостью выполнения норм СанПиН по ИК-облученности тела человека в производственных условиях: интенсивность теплового облучения головы — не более 15...60 Вт / м<sup>2</sup>, туловища человека — не более 25...150 Вт / м<sup>2</sup> в зависимости от температуры воздуха в помещении [4; 5].

В общем случае система ИК-обогрева состоит из одного или нескольких обогревателей, представляющих собой конструкцию из ИК-нагревателей или ТЭНов и отражателей, обеспечивающих заданное распределение мощности излучения в пространстве. Обогреватели соединены силовыми проводами со щитом управления и могут размещаться на высоте 3...7 м (и более) от поверхности пола [2; 3], что требует большой длины силовых кабелей. На практике управление нагревателями может производиться:

- 1) непосредственно вручную с помощью автоматических выключателей или тиристорных регуляторов типа ТРМ-3М [6] и др.;

- 2) дистанционно с помощью широко распространенных радиореле на частоте 433 МГц или аналогичных в сочетании с электромагнитным или симисторным реле (пускателем);

- 3) автоматически с помощью датчиков температуры и терморегуляторов, которые управляют симисторным реле или пускателем.

Следует учитывать, что автоматическое регулирование в системах обогрева зданий и сооружений способно обеспечить 5...15 % экономии энергии, в том числе за счет своевременного отключения нагревателей при достижении предельных температур [7].

При наличии датчиков температуры они размещаются в зоне ИК-нагрева и соединяются сигнальными слаботочными проводами с блоком регулирования, что при значительных размерах помещений требует большой длины проводки. При этом напряжение питания дат-

чиков, как правило, не превышает 5 В, сила тока аналоговых или цифровых сигналов — до 50 мА. Однако для обеспечения помехозащищенности передача аналоговых сигналов от датчика температуры к терморегулятору по проводам возможна на расстояние не более 1 м при их обязательном экранировании, поэтому предпочтительна передача цифрового сигнала по проводам или радиоканалу.

**Материалы и методы исследования.** Для обеспечения вышеприведенных требований разработана система дистанционного регулирования установкой ИК-обогрева, использующая беспроводное (ручное или автоматическое) управление мощностью ИК-нагревателей на основе беспроводной технологии обмена данными ESP NOW по радиоканалу на частоте 2,4 ГГц.

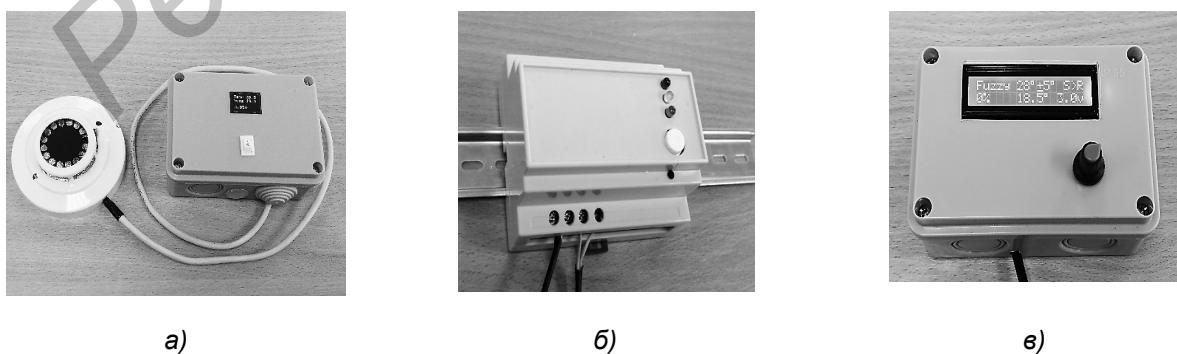
Конструктивно система дистанционного регулирования температуры включает три модуля (рисунок 1):

- 1) модуль датчика температуры, размещаемый непосредственно в контролируемой зоне помещения;
- 2) модуль регулятора, управляющий включением и отключением ИК-нагревателей в течение заданного времени цикла работы;
- 3) модуль сервера, располагаемый на расстоянии до 12...15 м от модулей регулятора и датчика в зоне доступа ответственного персонала, обеспечивающий беспроводную связь и настройку режимов работы.

Модуль датчика температуры функционально размещен в двух корпусах — непосредственно датчика и микроконтроллера, при этом в зоне нагрева помещения размещается только корпус с датчиком. Датчик может быть выполнен на основе термопары типа К с преобразователем MAX6675 или MAX31855, на основе термисторного датчика типа DS18B20 или ИК-датчика типа MLX90614 (рисунок 2). Во всех случаях на микроконтроллер от датчика передается цифровой сигнал, что обеспечивает помехоустойчивость при длине провода более 1 м (см. рисунок 1, а).

В корпусе с микроконтроллером находится аккумулятор типа 18650, который обеспечивает до 12 ч непрерывной работы модуля. Зарядка аккумулятора производится от обычного подзарядного устройства с напряжением 5 В через разъем micro-USB.

Датчик температуры (см. рисунок 1, а) представляет собой термопару типа К (хромель-алюмель), наклеенную на тонкую мембрану черного цвета, по периметру которой выполнена перфорация для уменьшения молекулярной теплопередачи на корпус датчика. Термопара имеет укороченные до 80 мм провода, по которым аналоговый сигнал передается на плату с преобразователем MAX6675, реализующим аналого-цифровое преобразование сигнала для дальнейшей передачи на микроконтроллер по интерфейсу SPI. В качестве измерительного преобразователя температуры можно также использовать преобразователь MAX31855 с термопарами разных типов, цифровой термисторный датчик DS18B20 в корпусе TO-92 или оптический ИК-датчик типа MLX90614 (таблица 1).



а — модуль датчика температуры; б — модуль регулятора нагрева; в — модуль сервера

**Рисунок 1. — Общий вид системы дистанционного регулирования ИК-нагревом**

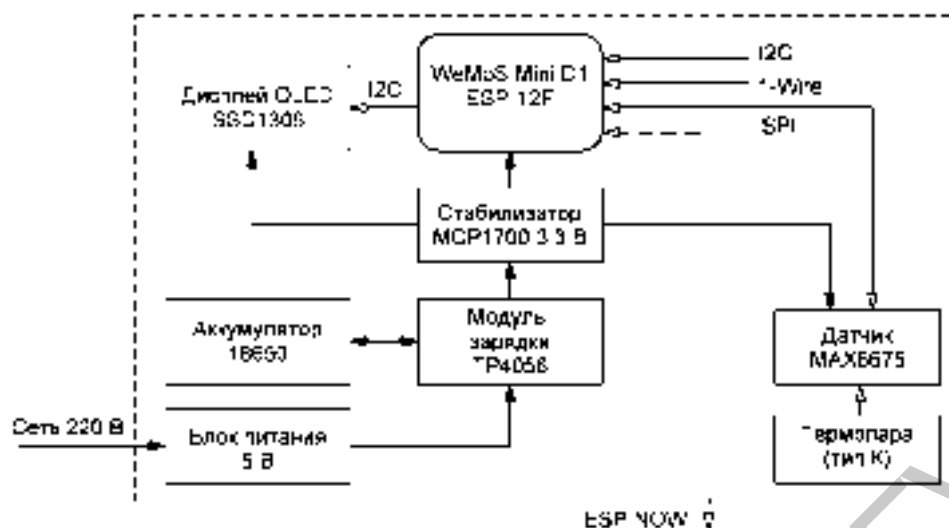


Рисунок 2. — Структурная схема модуля датчика температуры с преобразователем MAX6675

Т а б л и ц а 1. — Характеристики измерительных преобразователей температуры

Показатель	MAX6675	MAX31855	DS18B20	MLX90614
Тип измерительного преобразователя	Термопара (тип К)	Термопара (тип К, J, N, T, S, R или E)	Термистор	Оптический
Диапазон измерения температуры, °С	0...+600	-200...+1 300	-55...+125	-70...+380
Разрядность аналого-цифрового преобразователя, бит	12	14	12	17
Погрешность, °С	± 1,5	± 2	± 0,5...2,0	± 0,5...1,0
Интерфейс	SPI	SPI	1-Wire	I2C
Напряжение питания, В	3,0...5,5	3,0...3,6	3,0...5,5	2,4...5,5

Подключение различных типов датчиков позволяет использовать рассматриваемую систему регулирования не только для поддержания температуры в помещении в заданных пределах, но и для регулирования температуры в самых разных технологических процессах.

Микроконтроллер ESP8266 на плате Wemos D1 Mini обеспечивает передачу текущих значений температуры объекта нагрева и напряжения питания модуля на встроенный OLED-дисплей и на модуль сервера, применяя беспроводную технологию ESP NOW.

При использовании любого из вышеперечисленных типов датчиков передача цифрового сигнала между корпусами датчика и микроконтроллера обеспечивает необходимую помехозащищенность, при этом длина провода ограничена только конструктивными соображениями. Определение типа подключенного датчика и интерфейса (SPI, I2C или 1-Wire) в рассматриваемой системе выполняется автоматически.

Модуль регулятора нагрева (см. рисунок 1, б) построен на плате WeMos D1 Mini с микроконтроллером ESP-12F, который принимает по радиоканалу пакеты информации от модуля сервера и в зависимости от режима работы обеспечивает ручное или автоматическое управление нагревателем. Исполнительным органом служит симисторное реле типа FOTEK SSR-40DA (рисунок 3), однако могут быть использованы аналогичные однофазные или трехфазные аппараты с постоянным напряжением входного сигнала 3...5 В и током не менее 10 мА, например, трехфазный типа FOTEK TSR [8] или аналогичные.

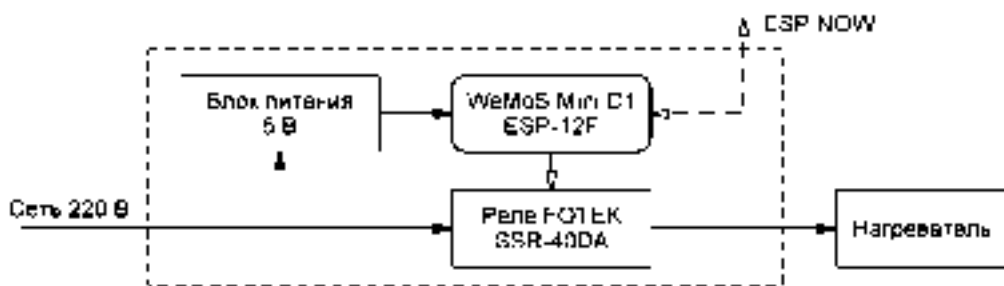


Рисунок 3. — Структурная схема модуля регулятора нагрева

На лицевой панели модуля регулятора, собранного в корпусе для монтажа на DIN-рейку, имеются три светодиода: желтый — питание включено; синий — наличие канала связи с сервером; красный — нагрев включен. Для коммутации и защиты предполагается установка на эту же DIN-рейку одно- или трехфазных автоматического выключателя и устройства защитного отключения.

Модуль сервера (рисунок 4) на микроконтроллере ESP32 выполняет:

- 1) прием и передачу по технологии ESP-NOW пакетов информации на модули датчика и регулятора мощности;
- 2) выбор режима работы, настройку параметров с помощью инкрементального энкодера;
- 3) отображение на двухстрочном индикаторе типа LCD1602 текущих значений температуры, относительной мощности  $p$  (%), текущих настроек и функционирования каналов связи модуля сервера с модулями датчика и регулятора;
- 4) функционирование асинхронного веб-сервера и формирование веб-страницы для передачи на смартфон или ноутбук по протоколу Wi-Fi (802.11 b/g/n).

Используемая для связи между модулями технология ESP-NOW представляет собой упрощенный протокол связи Wi-Fi на частоте 2,4 ГГц с передачей коротких пакетов между парами сопряженных устройств, разработанный фирмой Espressif для микроконтроллеров ESP8266 и ESP32 [9]. Технология ESP-NOW поддерживает следующие функции:

- 1) шифрование между сопряженными парами устройств;
- 2) идентификацию сопрягаемых устройств на основе их уникальных MAC-адресов;
- 3) передачу пакетов, содержащих до 250 байт полезной информации;
- 4) обратный вызов для информирования о статусе передачи пакетов;
- 5) дальность связи до 200 м при прямой видимости между сопрягаемыми устройствами и подключении внешних антенн.

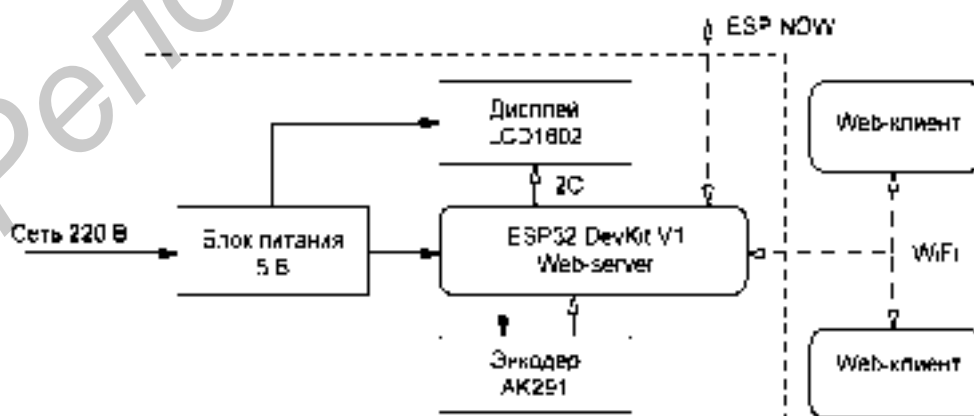


Рисунок 4. — Структурная схема модуля сервера

При использовании печатных антенн на платах типа WeMos D1 Mini с чипом ESP-12F и наличии препятствий проверенная дальность связи составляет 12...15 м. Веб-сервер, установленный на микроконтроллере модуля сервера, позволяет управлять параметрами регулирования температуры дистанционно с любого смартфона или компьютера в режиме реального времени. В результате управление системой ИК-обогрева может производиться как непосредственно с модуля сервера, так и с подключенного по Wi-Fi смартфона, ноутбука или компьютера.

Регулирование мощности нагревателя в предлагаемой системе осуществляется путем его периодического включения в сеть на заданные промежутки времени, которые могут составлять от 0,5 до 10,0 с и более. Относительная мощность нагревателя  $p$  (%) задается в процентах от номинальной мощности нагревательных элементов  $P_{\text{ном}}$  (Вт), которая соответствует номинальному напряжению питания. Такой подход дает возможность объединять в систему несколько нагревателей, в том числе с различной номинальной мощностью.

В системе реализованы три способа регулирования мощности.

1. Ручное регулирование в диапазоне  $p = 0...100$  % путем изменения продолжительности включения  $t_{\text{в}}$  (с) в течение каждого цикла работы  $t_{\text{ц}}$ :

$$P = P_{\text{ном}} t_{\text{в}} / t_{\text{ц}} = p P_{\text{ном}} / 100.$$

Фактически это низкочастотное широтно-импульсное регулирование мощности аналогично пакетному способу управления, реализованному в тиристорных регуляторах ТРМ-3М [6], в которых тиристор открывается с заданной задержкой включения и удерживается открытым в течение числа периодов пропорционально заданной мощности.

Время цикла работы может быть задано в интервале  $t_{\text{ц}} = 0,5...20,0$  с в зависимости от тепловой инерции нагревателя:

–  $t_{\text{ц}} = 5...20$  с и более — для керамических нагревателей типа ИКН-101 и ИКН-201 [10], которые характеризуются относительно большим значением постоянной времени нагрева  $T_0 = 2...4$  мин;

–  $t_{\text{ц}} = 0,5...2,0$  с — для нагревателей с открытой спиралью и кварцевых нагревателей типа ИКН-400 [10] с постоянной времени нагрева  $T_0 = 0,8...3,2$  мин.

2. Релейное двухпозиционное регулирование, основным параметром которого является гистерезис  $t_{\text{гист}}$  — разность температур при выключении и включении источника напряжения:

–  $p = 100$  %, если измеренная температура  $t$  (°С) объекта нагрева возрастает и превышает верхний порог  $t_2 = t_{\text{зад}} + t_{\text{гист}} / 2$ ;

–  $p = 0$  %, если температура объекта нагрева снижается и становится меньше нижнего порогового значения  $t_1 = t_{\text{зад}} - t_{\text{гист}} / 2$ .

3. Нечеткое регулирование, при котором среднее значение мощности  $P$  (Вт) поддерживается путем изменения продолжительности включения  $t_{\text{в}}$  в течение цикла  $t_{\text{ц}}$ , которое в данном случае определяется с учетом отклонения температуры от заданной и скорости изменения температуры [11].

В программном обеспечении дополнительно реализованы функции самодиагностики. Система в реальном времени контролирует напряжение питания модуля датчика, проверяет наличие связи с исполнительными устройствами и отслеживает выход температурных показателей за установленные пределы. При возникновении критических ошибок работа нагревателя блокируется с выводом уведомлений в веб-интерфейс.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Исследование работы системы дистанционного регулирования температуры проводилось в лабораторных условиях при температуре воздуха в помещении +18...20 °С. В качестве источника ИК-излучения использовался керамический нагреватель ИКН-101 номинальной мощностью 800 Вт без кожуха-отражателя [10]. Расстояние от рабочей поверхности нагревателя до мембраны датчика температуры — 0,4 м.

В результате установлено, что технология ESP-NOW обеспечивает устойчивое соединение и беспроводную передачу параметров настройки и индикации при расстоянии между модулями датчика, сервера и регулятора 12...14 м при наличии преград в виде стен и металлических конструкций. Связь по Wi-Fi между модулем сервера и смартфоном надежно работает при расстоянии между ними до 15 м.

Нечеткий способ регулирования обеспечивает более точное поддержание температуры, чем релейный двухпозиционный регулятор (таблица 2, рисунки 5, 6). Если при релейном регулировании (заданный гистерезис —  $\pm 1^\circ\text{C}$ ) реальный размах колебания температуры в стационарном режиме работы составляет около  $5^\circ\text{C}$  при коэффициенте вариации 2,5 %, то нечеткий регулятор обеспечивает коэффициент вариации не более 1 %.

Т а б л и ц а 2. — Характеристики работы нагревателя ИКН-101 при релейном и нечетком способах регулирования в течение 20 мин

Показатель	Способ регулирования	
	релейный	нечеткий
Среднее значение температуры, $^\circ\text{C}$	39,4	40,2
Интервал варьирования температуры, $^\circ\text{C}$	37,4...41,3	39,3...41,2
Коэффициент вариации температуры, %	2,55	0,72
Средняя продолжительность цикла работы, с	155,8	2
Средняя продолжительность включения нагревателя, с	107,1	1,15

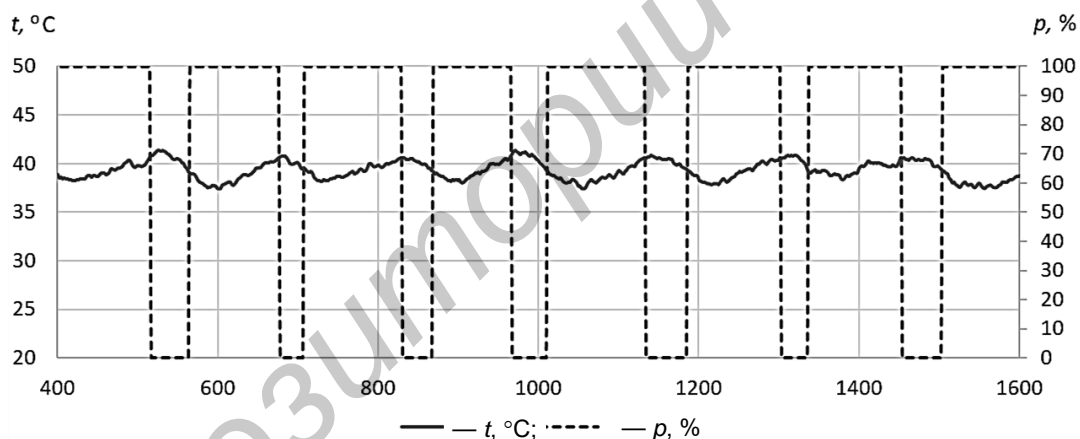


Рисунок 5. — Изменение относительной мощности  $p$  нагревателя и температуры  $t$  в стационарном режиме при релейном способе регулирования при заданном гистерезисе температуры  $\pm 1^\circ\text{C}$

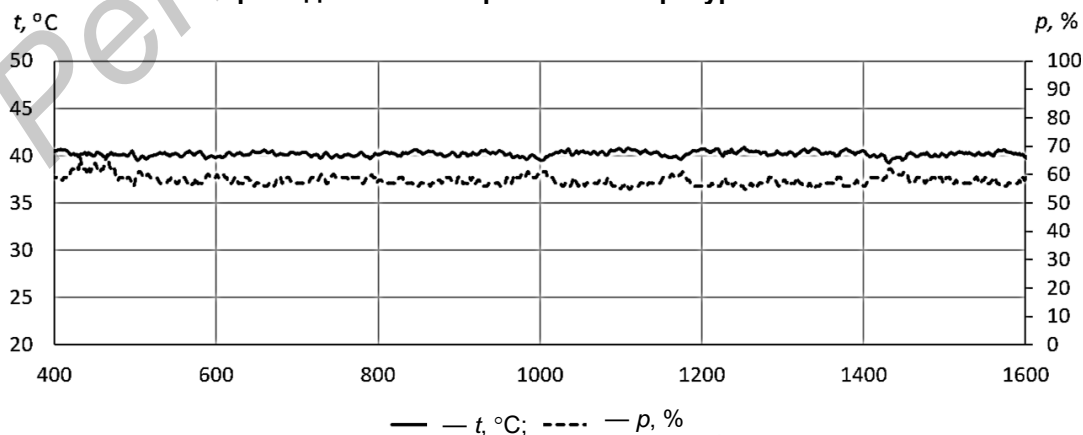


Рисунок 6. — Изменение относительной мощности  $p$  нагревателя и температуры  $t$  в стационарном режиме при нечетком регулировании при заданной ширине зоны регулирования  $\pm 5^\circ\text{C}$

Количество включений нагревателя при релейном регулировании составило 12 за 30-минутный период работы (см. рисунки 5, 6), средняя продолжительность цикла работы — 2,6 мин, среднее время нагрева — 1,78 мин. При нечетком регулировании продолжительность цикла работы была задана равной 2 с, ширина зоны регулирования — 5 °С, при этом среднее время включения составило 1,15 с, что соответствует средней относительной мощности  $p = 57,6\%$ . Это означает, что повышение точности поддержания температуры достигается в том числе за счет более частых включений нагревателя, что в ряде случаев может оказаться избыточным или неприемлемым.

При использовании обоих типов регулятора наблюдалась одинаковая скорость нагрева с начальной температуры 20 °С до заданной 40 °С — в среднем 0,07 °С/с (рисунок 7). Применение нечеткого алгоритма регулирования позволяет избежать эффекта «перерегулирования» температуры, характерного для релейных регуляторов в целом при наличии значительной тепловой инерции системы «нагреватель — объект нагрева — датчик температуры».

Вычислительных возможностей у микроконтроллера серии ESP8266, установленного в модуле регулятора, достаточно для реализации других алгоритмов автоматического регулирования нагревателями (ПИ-, ПИД-, импульсно-фазовый и т. п.), а также защитных блокировок. Также возможна реализация других функций: суточного или недельного программирования — при подключении к модулю сервера модуля часов реального времени, ограничения скорости нагрева и контроля их температуры, например, при подключении к модулю термодатчика термопары типа ТХА (К), которая встраивается в корпус нагревателей серии ИКН исполнения 2 [10].

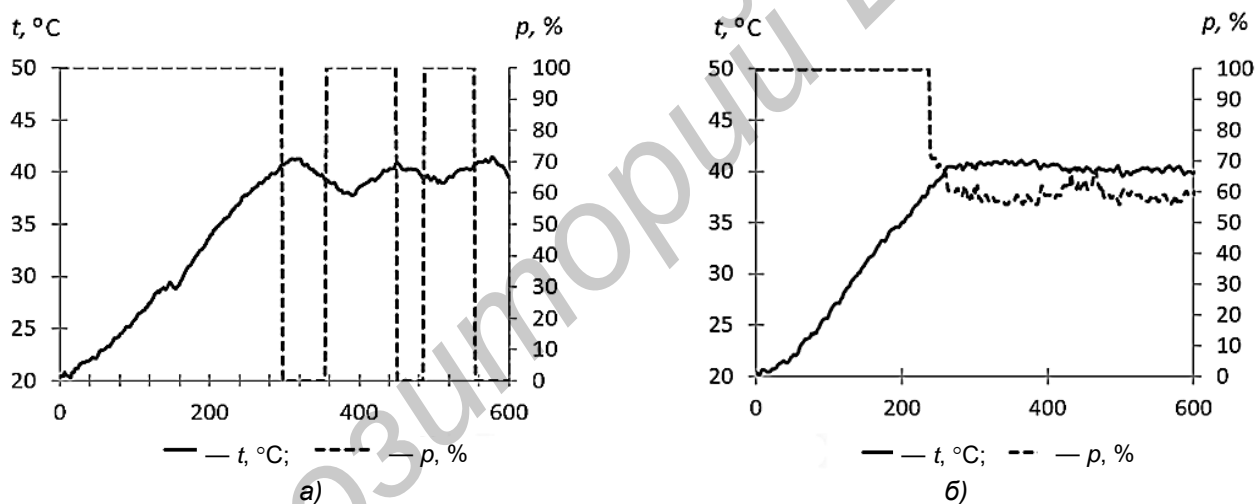


Рисунок 7. — Изменение относительной мощности  $p$  нагревателя и температуры  $t$  в процессе нагрева от 20 °С в течение 10 мин: а — при релейном регулировании; б — при нечетком регулировании

**Заключение.** Испытания в лабораторных условиях показали надежную работу системы дистанционного регулирования в ручном и автоматических режимах при расстоянии между модулями 12...15 м, что достаточно для условий промышленных предприятий. Разработанное программное обеспечение предусматривает автоматическое определение типа подключенного датчика и может быть адаптировано для управления процессом поддержания температуры для различных производственных процессов. В свою очередь, в программном обеспечении модуля регулятора могут быть реализованы различные алгоритмы управления температурой с учетом различных факторов и ограничений.

Определение мощности нагревательного устройства в относительных единицах относительно номинальной и модульный принцип комплектования пускозащитной аппаратуры дают возможность объединять в систему несколько нагревателей, в том числе с различной номинальной мощностью, для использования в больших производственных помещениях или нагревательных устройствах технологического назначения.

## Список цитируемых источников

1. Применение обогревателей различных типов в системах инфракрасного обогрева: ОДО «Номакон» и ОДО «Евролиния» [сайт]. — URL: [https://nomacon.by/ru/production/infrakrasnye-izluchately-i-nagrevately/-otoplenie-proizvodstvennyh-i-bytovyh-pomeshhenij/primenenie-obogrevatelej-razlichnyh-tipov-v-sistemah-infrakrasnogo-obogreva/](https://nomacon.by/ru/production/infrakrasnye-izluchатели-i-nagrevатели/-otoplenie-proizvodstvennyh-i-bytovyh-pomeshhenij/primenenie-obogrevatelej-razlichnyh-tipov-v-sistemah-infrakrasnogo-obogreva/) (дата обращения: 15.02.2026).
2. Инфракрасные обогреватели: Промышленный концерн Ballu [сайт]. — URL: [https://www.ballu.ru/catalog/tekhnika\\_dlya\\_doma\\_i\\_ofisa/obogrevately/](https://www.ballu.ru/catalog/tekhnika_dlya_doma_i_ofisa/obogrevately/) (дата обращения: 15.02.2026).
3. Отопление промышленных помещений. Локальный обогрев рабочих зон: ОДО «Номакон» и ОДО «Евролиния» [сайт]. — URL: <https://irh.by/production/obogrev-pomeshhenij-i-rabochih-mest/> (дата обращения: 15.02.2026).
4. Инфракрасный обогрев тела человека — нормативы и обеспечение микроклимата производственных помещений: ОДО «Номакон» и ОДО «Евролиния». — URL: <https://nomacon.by/ru/production/infrakrasnye-izluchately-i-nagrevately/-otoplenie-proizvodstvennyh-i-bytovyh-pomeshhenij/> (дата обращения: 15.02.2026).
5. Требования к микроклимату рабочих мест в производственных и офисных помещениях : санитар. нормы и правила : утв. постановлением М-ва здравоохранения Респ. Беларусь от 30 апр. 2013 г. № 33 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. — URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21327576p> (дата обращения: 26.02.2026).
6. Трёхфазный тиристорный регулятор ТРМ-3М (30-720А). ТУ 3428-006-31928807-2014. Описание и руководство по эксплуатации: ЗАО «Меандр» [сайт]. — URL: <https://www.meandr.ru/trm-3> (дата обращения: 10.02.2026).
7. *Виноградов, А. Н.* Сбережение тепловой энергии на объектах ЖКХ с применением технологии «Интернет вещей» и Wi-Fi-датчиков температуры / А. Н. Виноградов, В. П. Чипулис // Энергосбережение. — 2017. — № 7. — URL: [https://www.abok.ru/for\\_spec/articles.php?nid=6775](https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=6775), <https://www.elec.ru/publications/peredacha-raspredelenie-i-nakoplenie-elektroenergi/1388/> (дата обращения: 15.02.2026).
8. Твердотельные реле FOTEK TSR: Компания «ЭЛЭРИС» [сайт]. — URL: <https://eleris.ru/-trehfaznye-ts.html> (дата обращения: 15.02.2026).
9. ESP-IDF Programming Guide: ESP-NOW [сайт]. — URL: [https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/stable/esp32/api-reference/network/esp\\_now.html](https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/stable/esp32/api-reference/network/esp_now.html) (дата обращения: 15.02.2026).
10. Инфракрасные излучатели и нагреватели: ОДО «Номакон» и ОДО «Евролиния» [сайт]. — URL: <https://nomacon.by/ru/production/infrakrasnye-izluchately-i-nagrevately/> (дата обращения: 25.02.2026).
11. *Singhala, P.* Temperature Control using Fuzzy Logic / P. Singhala, D. N. Shah, B. Patel // International Journal of Instrumentation and Control Systems (IJICS). — 2014. — Vol. 4. — No.1, January (DOI : 10.5121/ijics.2014.4101). — URL: [https://www.researchgate.net/publication/260232896\\_Temperature\\_Control\\_using\\_Fuzzy\\_Logic](https://www.researchgate.net/publication/260232896_Temperature_Control_using_Fuzzy_Logic) (дата обращения: 25.02.2026).

Поступила в редакцию 08.04.2026.

УДК 621.9

**А. Н. Жигалов<sup>1</sup>**, доктор технических наук, доцент,  
**И. А. Горавский<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Государственное научное учреждение «Институт технологии металлов  
Национальной академии наук Беларуси», ул. Бялыницкого-Бирули, 11, 212030 Могилев,  
Республика Беларусь, +375 (29) 630 15 17, jigalov6@mail.ru

<sup>1,2</sup>Учреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Войкова, 21,  
225404 Барановичи, Республика Беларусь

## ИССЛЕДОВАНИЯ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКЕ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ Р6М5

Обработка методом аэродинамического звукового упрочнения заключается в низкотемпературной аэродинамической вибрационной обработке, являющейся способом физико-технического воздействия на материал, основанной на сочетании предварительного нагрева до температур, не вызывающих фазовых превращений, и низкочастотного вибрационного воздействия, обеспечивающего релаксацию остаточных напряжений и перераспределение дефектов кристаллической структуры.

**Ключевые слова:** метод аэродинамического звукового упрочнения; быстрорежущие стали; виброскорости; виброперемещения; циклические напряжения; металлорежущий инструмент.

Рис. 5. Табл. 4. Библиогр.: 8 назв.

**A. N. Jigalov<sup>1</sup>**, DSc in Technical Sciences, Associate Professor,  
**I. A. Goravskii<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>State Scientific Institution “Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus”,  
11 Byalynitskogo-Biruli Str., 212030 Mogilev, the Republic of Belarus,  
+ 375 (29) 630 15 17, jigalov6@mail.ru

<sup>1,2</sup>Institution of Education “Baranavichy State University”, 21 Voykova Str., 225404 Baranavichy,  
the Republic of Belarus

## RESEARCH OF AMPLITUDE-FREQUENCY CHARACTERISTICS IN AERODYNAMIC SOUND TREATMENT OF R6M5 HIGH-SPEED STEEL

Aerodynamic sound hardening treatment involves low-temperature aerodynamic vibration treatment — a method of physical and technical influence on a material based on a combination of preliminary heating to temperatures that do not cause phase transformations and low-frequency vibration exposure, which ensures the residual stresses relaxation and the defects redistribution in the crystalline structure.

**Key words:** aerodynamic sound hardening method; high-speed steels; vibration speeds; vibration displacements; cyclic stress; metal-cutting tool.

Fig. 5. Table. 4. Ref.: 8 titles.

**Введение.** В твердых телах, в том числе сталях, существует запасенная энергия — энергия, за счет которой термодинамическая система (без подвода тепла извне) способна совершать работу. Энергия в твердом теле может быть запасена в виде различных дефектов в кристаллической решетке, например, дефектов Френкеля [1]. Запасенная энергия является важным фактором, определяющим предел прочности материала как состояние с максимальной запасенной энергией.

Энергия, запасенная в стали, проявляется через внутренние напряжения, дефекты кристаллической решетки (дислокации, вакансии) и накопленные искажения, которые повышают ее внутреннюю энергию и потенциально могут быть выделены при нагреве или обработке, вызывая изменения в механических свойствах (твердость, пластичность), а также как энергия, «запертая» в напряжениях после пластической деформации (например, при

прокатке, изгибе и др.). Разные структуры стали (перлит, мартенсит), легирующие элементы и термообработка определяют, сколько энергии может запасти и отдать сталь, что важно для упругости и ударостойкости [1].

Повысить ресурс концевой фрезерного инструмента из быстрорежущих сталей при процессах прерывистого резания возможно за счет уменьшения уровня запасенной энергии, что обеспечит снятие внутренних напряжений и уменьшение плотности дислокаций структуры, а значит, произойдет увеличение ударной вязкости инструментального материала.

**Материалы и методы исследования.** Наиболее эффективно уменьшить уровень запасенной энергии при сохранении исходных параметров по твердости возможно за счет воздействия энергий от механических колебаний, образованных звуковыми волнами, при методе аэродинамического звукового упрочнения (далее — АДУ) [2].

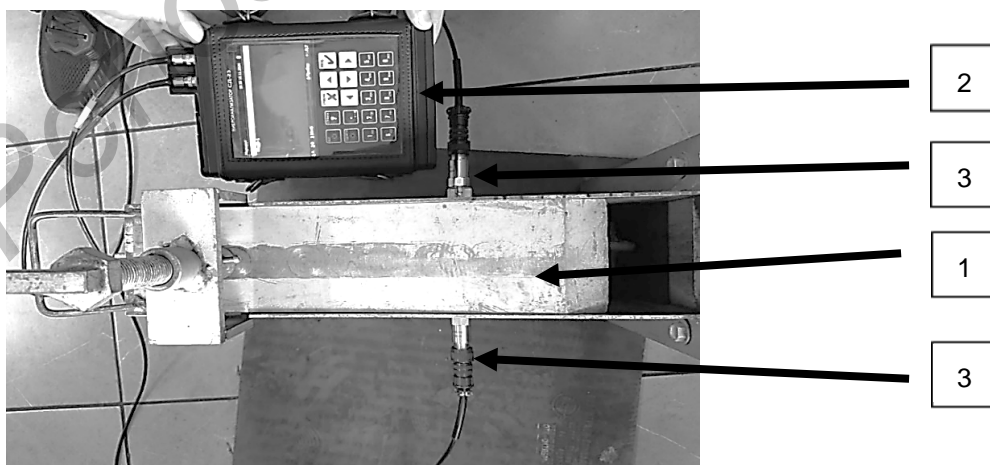
Метод АДУ не является общепринятым физико-техническим методом упрочнения в международной практике в отличие, например, от ультразвуковой обработки (20...40 кГц), виброударного упрочнения, термомеханической обработки. Звуковое воздействие при методе АДУ в диапазоне 150...70 Гц не имеет пока теоретической, строго доказанной физической интерпретации как самостоятельного механизма пластической релаксации кристаллической решетки и носит полуэмпирический характер.

При АДУ воздействие на обрабатываемый материал носит квазистатический вибрационный характер, а не волновой в строгом физическом смысле. В установке реализуется механический резонанс стенок камеры и системы «камера—воздух».

Резонансные частоты 150...170 Гц внешнего воздействия относятся к низкочастотным механическим колебаниям. Генерация резонансных волн стенок камеры подчиняется законам линейной акустики и теории звуковых волн.

Для оценки амплитудно-частотных характеристик проводились измерения среднеквадратичного значения виброскорости и частоты в диапазоне 10...6 400 Гц. В качестве измерительного прибора использовался виброанализатор СД-23 (ООО «Ассоциация ВАСТ», Россия), принцип работы которого основан на измерении электрического сигнала, поступающего от преобразователей вибраций, установленных на колеблющихся стенках установки АДУ. Преобразование входных аналоговых сигналов первичных преобразователей осуществляется с применением устройства, преобразующего аналоговый сигнал в цифровой, для каждого канала. С помощью преобразователей вибраций сигнал передается на виброанализатор СД-23.

На рисунке 1 представлены приборы и устройства, участвующие при измерении амплитудно-частотных характеристик установки АДУ.



1 — установка АДУ; 2 — виброанализатор СД-23; 3 — преобразователи вибраций

**Рисунок 1. — Установка АДУ, виброанализатор СД-23 и преобразователи вибраций при измерении амплитудно-частотных характеристик**

При колебании стенок резонансной камеры установки АДУ образуются акустические волны [2]. Продольные волны могут распространяться в средах, в которых возникают упругие силы при деформациях сжатия и растяжения, т. е. в твердых, жидких и газообразных средах. Продольные волны перемещаются в средах в виде чередующихся сгущений и разрежений среды. Поперечные волны могут распространяться в среде, в которой возникают упругие силы при деформации сдвига, т. е. только в твердых телах. В газах возникают только продольные волны, а в твердых телах — как продольные, так и поперечные волны [3].

**Результаты исследования и их обсуждение.** Резонансные амплитуды виброперемещений  $A_{рез}$  (мм) определялись в зависимости от резонансных амплитуд виброскоростей  $V_{рез}$  (мм/с) и резонансных частот  $\omega_{рез}$  (Гц), связанных с периодом — интервалом времени, в течение которого происходит одно полное колебание, по формуле [4]

$$A_{рез} = \frac{V_{рез}}{2\pi\omega_{рез}}. \quad (1)$$

Резонансные амплитуды  $V_{рез}$  и частоты  $\omega_{рез}$  фиксировались экспериментально виброанализатором СД-23 с помощью преобразователя вибраций частот [5].

При расчетах  $A_{рез}$  принимались значения плотности  $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$  для стали 10, из которой изготавливались вибрирующие стенки резонансной камеры установки АДУ.

В таблице 1 приведены значения резонансных частот  $\omega_{рез}$ , виброскоростей  $V_{рез}$ , виброперемещений  $A_{рез}$  в центре колеблющихся боковых стенок (левой и правой) резонансной камеры установки АДУ при различных размерах выходного канала.

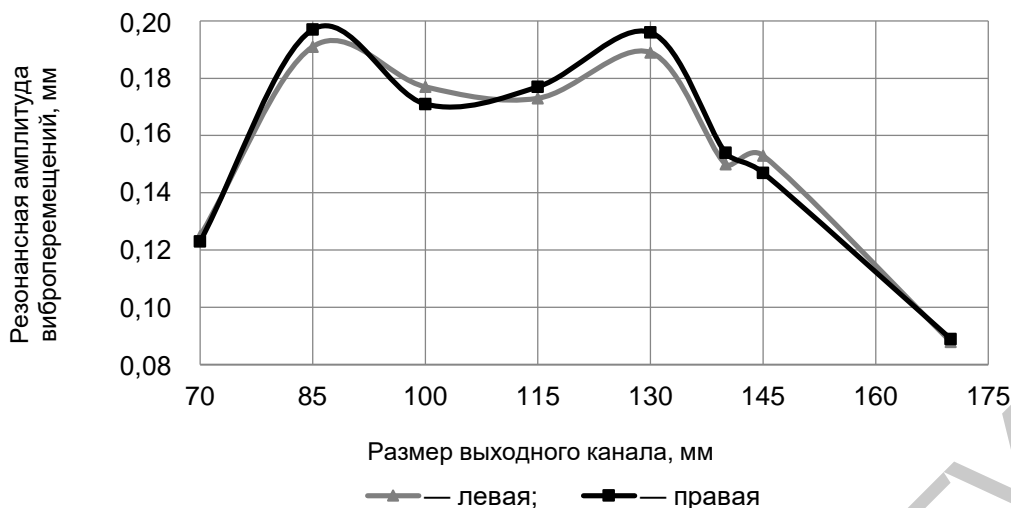
Как видно из таблицы 1, существует некоторое расхождение значений виброскоростей и амплитуд виброперемещений, генерируемых левой и правой сторонами резонатора установки АДУ, которое составляет не более 4,1 %. Расхождения образуются из-за погрешности измерения (размещения преобразователей вибраций), настройки самой установки АДУ, неровности пола и других факторов. Однако такая погрешность, являющаяся весьма приемлемой, нивелируется за счет смещения центра пересечения встречных волн, поступающих от левой и правой колеблющихся стенок резонатора.

На рисунке 2 приведены зависимости резонансных амплитуд виброперемещений  $A_{рез}$  от размера входного канала установки АДУ.

На графиках (см. рисунок 2) видны два максимума, на которых образуются наибольшие резонансные амплитуды виброскоростей: при размерах входных каналов 85 и 130 мм. Подтверждено, что на рациональных режимах обработки при АДУ инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 (режим 1 — на частоте 154 Гц и при размере входного канала 85 мм; режим 2 — на частоте 168 Гц и при размере входного канала 130 мм) образуются также наибольшие резонансные виброперемещения [5].

Т а б л и ц а 1. — Энергетические характеристики колеблющихся стенок установки АДУ

Размер выходного канала, мм	$\omega_{рез}$ , Гц	$V_{рез}$ , мм/с		$A_{рез}$ , мм	
		Левая стенка	Правая стенка	Левая стенка	Правая стенка
70	154	121	119	0,125	0,123
85	154	185	191	0,191	0,197
100	150	167	161	0,177	0,171
115	151	179	186	0,173	0,177
130	168	182	187	0,189	0,196
140	152	143	147	0,150	0,154
145	152	146	140	0,153	0,147
170	150	83	84	0,088	0,089



**Рисунок 2. — Зависимости резонансных амплитуд виброскоростей от размера входного канала установки АДУ**

Передача акустической волны от стенки камеры к изделию происходит через воздушную среду. Коэффициент прохождения волны из воздуха в сталь зависит от акустических импедансов  $Z$  — характеристик сред, определяющих сопротивление распространению звука, которые определялись по формуле

$$Z = \rho c_c,$$

где  $c_c$  — скорость звука.

При  $\rho \approx 1,2 \text{ кг/м}^3$  и  $c_c \approx 343 \text{ м/с}$  акустический импеданс воздуха  $Z_1 \approx 411 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$ . При  $\rho \approx 8\,300 \text{ кг/м}^3$  для стали Р6М5 и  $c_c \approx 5\,900 \text{ м/с}$  (для продольной волны) акустический импеданс быстрорежущей стали  $Z_2 \approx 48\,970\,000 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$ .

Коэффициент отражения волны  $R$  определяется как [6]

$$R = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right). \quad (2)$$

После подстановки в (2) значений акустических импедансов воздуха и стали получим следующее:

$$R = \left( \frac{47\,790\,000 - 411}{47\,790\,000 + 411} \right) = 0,99998277.$$

Коэффициент прохождения волны

$$T = 1 - R \approx 1 - 0,99998277 \approx 0,00001723. \quad (3)$$

Коэффициент прохождения волны  $T$  очень близок к нулю, а это означает, что часть энергии не проходит через среду, а отражается от границы «воздух—сталь».

Из формулы (3) для коэффициента отражения видно, что чем больше отличаются акустические импедансы сред, тем большая часть энергии звуковой волны отразится от границы раздела двух сред. Этим и объясняется как возможность, так и эффективность функционирования установки АДУ. В установке АДУ акустические давления отраженных волн от границы раздела сред (воздух—сталь) суммируются с акустическим давлением от источника [7].

Решение задачи воздействия на изделие усиленного акустического давления от генерируемой волны колеблющихся стенок резонатора установки АДУ осуществлялось через работу деформации, которую обеспечивает акустическое давление на поверхность изделия из быстрорежущей стали Р6М5.

Оценка напряжений, возникающих в обрабатываемом изделии от квазистатического вибрационного характера, осуществлялась с позиций сопротивления материала воздействию виброперемещениям. Согласно закону Гука [8], напряжения  $\sigma$  (МПа), возникающие в изделии от воздействия деформаций  $\varepsilon = A_{рез}$ , зависят от модуля Юнга  $E$  (МПа), обрабатываемого изделия и определяются как

$$\sigma = A_{рез}E. \quad (4)$$

Деформации, воздействующие на обрабатываемое изделие в резонансной камере установки АДУ, определялись следующим образом. Преобразователь вибраций, соединенный с виброанализатором СД-23, устанавливали непосредственно на специально изготовленном образце из быстрорежущей стали Р6М5 диаметром 30 мм и толщиной 8 мм, который закреплялся в центре поддерживающего устройства. Само поддерживающее устройство размещалось внутри резонансной камеры установки АДУ (рисунок 3).

На изделии от воздействия акустических волн, возникающих от резонансных колебаний стенок установки АДУ, фиксировались резонансные виброскорости и частоты. Значения резонансных виброскоростей, частот, а также рассчитанных резонансных амплитуд виброперемещений по (1) и напряжений по (4), возникающих в изделии, размещенном упруго в поддерживающем устройстве, сведены в таблицу 2.



**Рисунок 3. — Виброанализатор СД-23 и преобразователь вибраций при измерении амплитудно-частотных характеристик внутри установки АДУ**

**Т а б л и ц а 2. — Значения частот, виброскоростей, амплитуд виброперемещений и напряжений, возникающих в изделии, размещенном упруго в поддерживающем устройстве**

Размер выходного канала, мм	Виброскорость $V_{рез}$ , мм / с	Частота $\omega_{рез}$ , Гц	Амплитуда виброперемещений $A_{рез}$ , мкм	Напряжения в изделии, МПа
70	15,7	150	17	5 100
85	37,0	148	40	12 100
100	35,5	147	38	11 700
115	35,7	147	39	11 800

Окончание табл. 2.

Размер выходного канала, мм	Виброскорость $V_{рез}$ , мм / с	Частота $\omega_{рез}$ , Гц	Амплитуда виброперемещений $A_{рез}$ , мкм	Напряжения в изделии, МПа
130	37,5	146	41	12 500
140	29,8	145	33	10 000
145	27,3	144	30	9 200
160	8,48	134	10	3 100

На рисунке 4 приведены зависимости напряжений, возникающих в изделии, размещенном упруго в поддерживающем устройстве, при различных размерах выходного канала резонансной камеры установки АДУ.

Анализ данных таблицы 2 и рисунка 4 показывает, что при АДУ на изделие, размещенное упруго в поддерживающем устройстве, при размере выходного канала резонансной камеры 85 и 130 мм действуют напряжения порядка 12 100...12 500 МПа. Такие напряжения, превышающие предел прочности при изгибе 2 250...3 800 МПа и предел прочности при сжатии 3 450...4 660 МПа быстрорежущих сталей, способны такую сталь разрушить, но этого не происходит из-за того, что само изделие упруго перемещается относительно поддерживающего устройства.

Проведено дополнительное исследование по определению уровня напряжений, возникающих от АДУ непосредственно в изделии, устранив влияние упругих деформаций поддерживающего устройства. Для этого в поддерживающем устройстве закрепляли массивную заготовку из Р6М5 толщиной 25 мм. Само поддерживающее устройство утяжеляли, приваривая к нижнему основанию поддерживающего устройства металл весом около 3,0 кг, и устанавливали в камере без возможности перемещения.

Результаты замеров резонансных виброскоростей и частот, а также рассчитанных по (1) и (4) резонансных амплитуд виброперемещений и деформаций, возникающих в изделии, размещенном жестко в поддерживающем устройстве, сведены в таблицу 3.

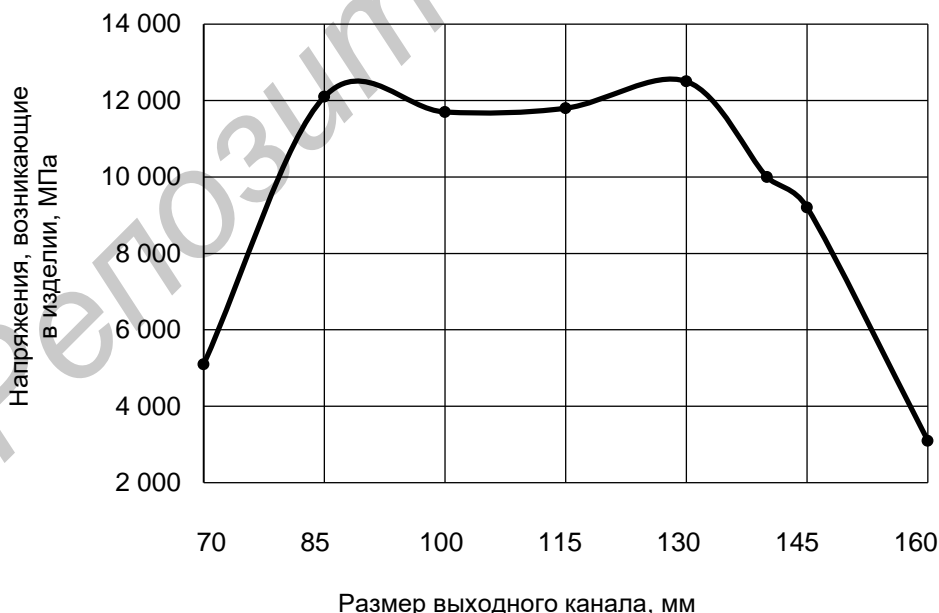


Рисунок 4. — Зависимость напряжений, действующих на изделие, размещенное упруго в поддерживающем устройстве, при различных размерах выходного канала резонансной камеры установки АДУ

Т а б л и ц а 3. — Значения частот, виброскоростей, амплитуд виброперемещений и напряжений, возникающих в изделии, размещенном жестко в поддерживающем устройстве

Размер выходного канала, мм	Резонансная виброскорость $V_{рез}$ , мм / с	Частота $\omega_{рез}$ , Гц	Амплитуда виброперемещений $A_{рез}$ , мкм	Напряжения в изделии, МПа
70	1,40	155	1,4	309
85	2,06	147	2,2	480
100	1,87	148	2,0	433
115	1,74	151	1,8	395
130	2,00	150	2,1	456
140	1,53	150	1,6	349
145	1,43	143	1,6	342
160	0,92	144	1,0	219

На рисунке 5 приведены зависимости напряжений, возникающих в изделии, размещенном жестко в поддерживающем устройстве, при различных размерах окна резонансной камеры установки АДУ.

Анализ данных таблицы 3 и рисунка 5 показывает, что при АДУ на изделие, размещенное жестко в поддерживающем устройстве, при размере выходного канала резонансной камеры 85 и 130 мм действуют циклические напряжения порядка 456...480 МПа. Такие циклические напряжения, являющиеся значительно ниже предела прочности при изгибе 2 250...3 800 МПа и предела прочности при сжатии 3 450...4 660 МПа быстрорежущих сталей, не способны разрушить такую сталь, но в то же время воздействие такого уровня циклических напряжений при АДУ на изделие из быстрорежущей стали близко к возможности уменьшения напряжений, существующих в концевом фрезерном инструменте уровня 400...600 МПа, изменения напряжений растяжения на напряжения сжатия.

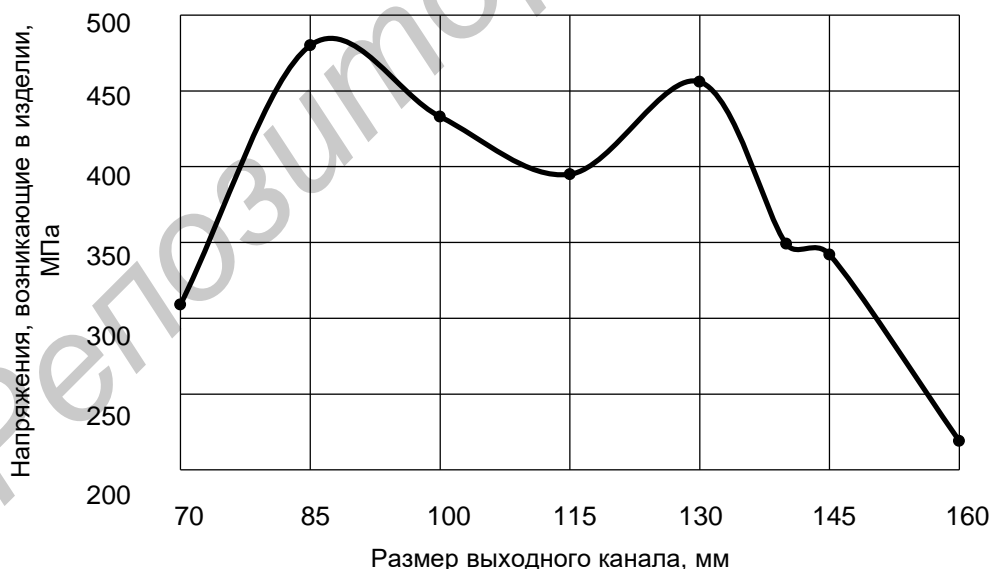


Рисунок 5. — Зависимость напряжений, действующих на изделие, размещенное жестко в поддерживающем устройстве, при различных размерах выходного канала резонансной камеры установки АДУ

**Заключение.** При аэродинамической звуковой обработке концевой фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 в диапазоне звукового спектра частот 150...170 Гц возникают волновые вибрационные воздействия, генерирующие на боковых стенках резо-

нансной камеры установки АДУ виброскорости и виброперемещения, формирующие через воздушную среду в инструменте циклические напряжения 456...480 МПа, обеспечивающие повышение активности движения и снижение плотности дислокаций, их аннигиляцию, уменьшение напряжений.

Установлено, что при АДУ существуют два рациональных режима обработки, на которых в обрабатываемом изделии из быстрорежущей стали Р6М5 образуются наибольшие циклические напряжения: режим 1 на частоте 154 Гц при размере выходного канала 85 мм образует циклические напряжения 480 МПа; режим 2 на частоте 168 Гц при размере выходного канала 130 мм образует циклические напряжения 456 МПа.

#### Список цитируемых источников

1. *Мостовщиков, А. В.* Виды запасенной энергии в твердых телах : монография / А. В. Мостовщиков ; под ред. А. П. Ильина ; Том. политехн. ун-т. — Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2017. — 119 с.
2. *Жигалов, А. Н.* Теоретические и технологические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.07 / А. Н. Жигалов. — Мн., 2021. — 382 л.
3. *Борисовский, В. В.* Колебания и волны (теория и практика) : учеб. пособие для студентов всех направлений / В. В. Борисовский ; Рубц. индустр. ин-т. — Рубцовск, 2014. — 48 с.
4. *Инженерная акустика и практика борьбы с шумом : учебник.* — М. : Университет. кн. : Логос, 2008. — 424 с.
5. *Горавский, И. А.* Энергетические процессы при аэродинамическом звуковом упрочнении концевой фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 / И. А. Горавский, А. Н. Жигалов // *Материалы и технологии.* — 2024. — № 2 (14). — С. 10—18.
6. *Соловьянова, И. П.* Теория волновых процессов: акустические волны : учеб. пособие / И. П. Соловьянова, С. Н. Шабунин. — Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. — 142 с.
7. *Теоретическое обоснование формирования слабых ударных волн в процессе аэродинамического звукового упрочнения / А. Н. Жигалов, Ю. Д. Черняков, М. В. Башаримов [и др.] // Вестник БарГУ. Серия «Технические науки».* — 2025. — Вып. № 1 (17). — С. 22—30.
8. *Безъязычный, В. Ф.* Обеспечение показателей качества поверхностного слоя деталей ГТД и их влияние на эксплуатационные свойства : учеб. пособие / В. Ф. Безъязычный. — Рыбинск : Сатурн, 2004. — 314 с.

Поступила в редакцию 26.03.2026.

УДК 629.114.2

**К. Н. Князев, В. Н. Клочков, М. Э. Подымако**Открытое акционерное общество «Могилевский завод лифтового машиностроения»,  
пр-т Мира, 42, 212030 Могилев, Республика Беларусь**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЛИФТА  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОЙ СИСТЕМЫ  
ВИРТУАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ADAMS**

В статье рассмотрен подход к математическому моделированию в среде Adams динамических процессов работы лифтового оборудования. Сформированы принципы определения необходимых параметров для формирования математической модели, описывающих взаимодействие элементов лифта, их механические характеристики, параметры жесткости тягового элемента (каната), величины приведенного коэффициента трения пары взаимодействия «канат — канатопроводящий шкив». В процессе работы проведен сравнительный анализ натурного эксперимента и расчетной модели на примере ограничителя скорости кабины лифта и оценка влияния на динамические процессы податливости рамы лебедки на примере серийно выпускаемого лифта грузоподъемностью 400 кг.

**Ключевые слова:** канат; приведенный коэффициент трения; модуль продольной упругости; замедление; лифт.  
Рис. 14. Табл. 4. Библиогр.: 10 назв.

**K. N. Kniazev, V. N. Klochkov, M. E. Podymako**

Joint Stock Company “Mogilev Elevator Plant”, 42 Mira Ave., 212030 Mogilev, the Republic of Belarus

**SIMULATION OF ELEVATOR DYNAMIC PROCESSES USING  
THE ADAMS VIRTUAL MODELING SYSTEM**

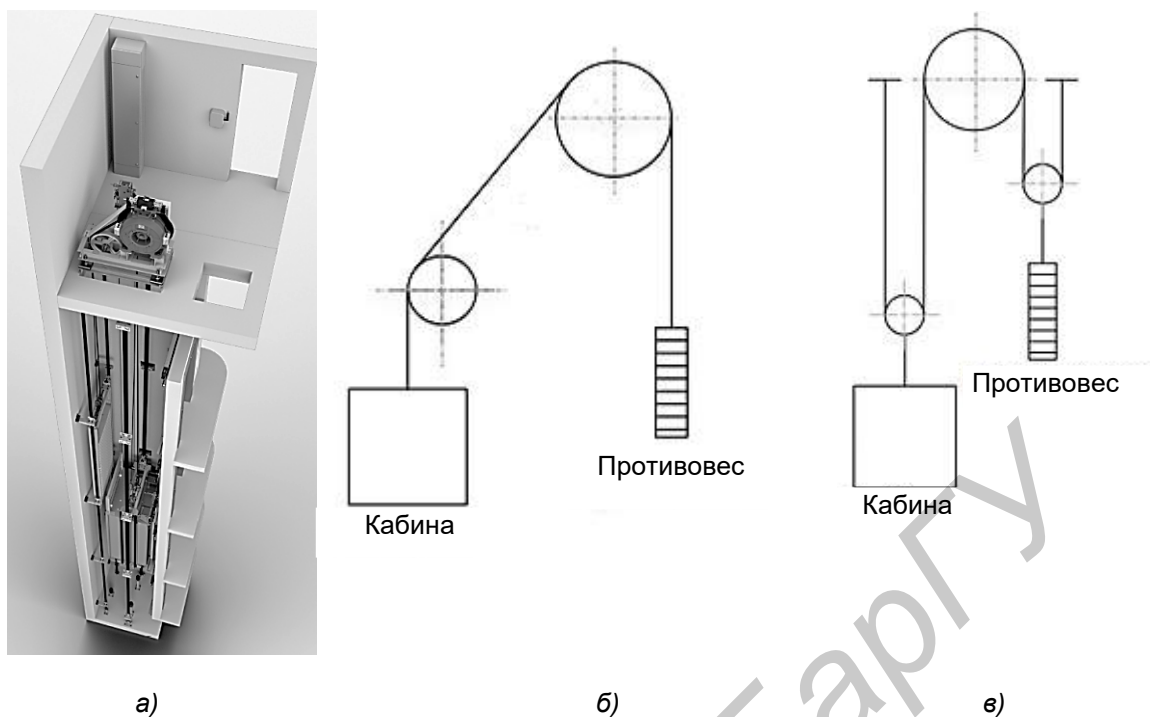
The article considers an approach to mathematical modeling in the Adams environment of dynamic processes of elevator equipment operation. The principles of determining the necessary parameters for the mathematical model formation describing the elevator elements interaction, their mechanical characteristics, stiffness parameters of the traction element (rope), and the reduced value of the rope friction coefficient — rope pulley interaction pair are formed. In the course of the work, a comparative analysis of a full-scale experiment and a computational model has been carried out using the example of an elevator cabin speed limiter and an assessment of the impact on dynamic processes of the winch frame malleability using the example of a mass-produced g / n 400 kg elevator.

**Key words:** rope; friction coefficient; longitudinal elasticity modulus; deceleration; elevator.

Fig. 14. Table 4. Ref.: 10 titles.

**Введение.** Для повышения безопасности работы лифтового оборудования требуется четкое понимание работы основных элементов лифта в процессе эксплуатационных и аварийных режимов работы. Такое понимание позволит проводить проектирование оптимальных с позиции соотношения «затраты—качество» конструкций узлов и элементов лифта, а также выявлять причины нарушения работоспособности лифтового оборудования в эксплуатации. Применение современных подходов и программного обеспечения позволяет проводить данный анализ с максимальным приближением к реальным объектам и, как следствие, оптимальному проектированию лифта.

В данной работе лифт рассматривается как объект динамического анализа в упрощенной постановке задачи с последующей валидацией полученных результатов. Общий вид и кинематическая схема типового лифта грузоподъемностью 400 кг с прямым подвесом представлены на рисунке 1. Дополнительно представлена кинематическая схема с полиспасной подвеской (см. рисунок 1, в).



а — общий вид; б — прямой подвес; в — полиспаст (2 : 1)

**Рисунок 1. — Общий вид и кинематическая схема лифта**

Основные составные части лифта:

- лебедка;
- кабина;
- противовес;
- двери шахты;
- ограничитель скорости;
- направляющие кабины и противовеса, детали их крепления;
- оборудование прямки;
- пружины ответственного назначения;
- устройство управления лифтом;
- устройства, обеспечивающие наличие безопасного пространства в прямке и на крыше кабины.

**Материалы и методы исследования.** Математическое моделирование динамики движения лифта является одной из основных задач для определения силового взаимодействия компонентов лифтового оборудования, движения в эксплуатационных и аварийных режимах.

Особенностью моделирования динамики движения лифта является тросовая гибкая связь (канат) между кабиной и противовесом, проходящая через канатоведущий шкив, передающий усилие посредством силы трения. Проведение анализа данной системы аналитическими методами сопряжено с составлением сложных математических уравнений движения и реализацией их решения. Для повышения оперативности анализа подобных систем рациональным направлением является использование специализированных программных продуктов.

Наиболее распространенным программным продуктом в области проектирования динамических систем является Adams (модуль Adams/View). Решение в данном программном продукте основано на применении уравнений Эйлера—Лагранжа, которые дают метод составления уравнений движения, не зависящий от сложности конкретной системы. Большое преимущество уравнений Эйлера—Лагранжа состоит в том, что число их равно числу степеней свободы системы и не зависит от количества входящих в систему точек и тел. Кроме

того, при идеальных связях из уравнений Эйлера—Лагранжа автоматически исключаются все неизвестные реакции связей. По этим причинам уравнения Эйлера—Лагранжа широко используются при решении многих задач механики, в частности, в динамике машин и механизмов [1].

**Результаты исследования и их обсуждение.** Формирование исходных данных для моделирования работы лифта в среде Adams.

На рисунке 2 представлена динамическая модель лифта с прямым подвесом.

Исходя из приведенной динамической модели, для составления расчетной схемы требуется определение параметров жесткости и демпфирования соответствующих элементов.

*Определение приведенного коэффициента жесткости и коэффициента демпфирования лифтового буфера  $c_3$  и  $k_3$ .* Буфера представляют собой устройство (подобие пружины), устанавливаемые в прямке шахты, для амортизации и остановки движущейся вниз кабины (противовеса) путем накопления или рассеивания кинетической энергии, если кабина (противовес) в аварийной ситуации проходит ниже крайнего рабочего положения.

Параметр жесткости  $k_3$  (коэффициент жесткости) энергонакапливающего буфера с нелинейными характеристиками характеризуется его геометрической формой и упругими свойствами материала и определяется отношением приращения усилия (силы), прилагаемого к конструкции, к приращению максимальной деформации, вызванной этой силой.

Параметр демпфирования  $c_3$  (коэффициент демпфирования) характеризует способность материала рассеивать энергию упругой деформации во время механических колебаний.

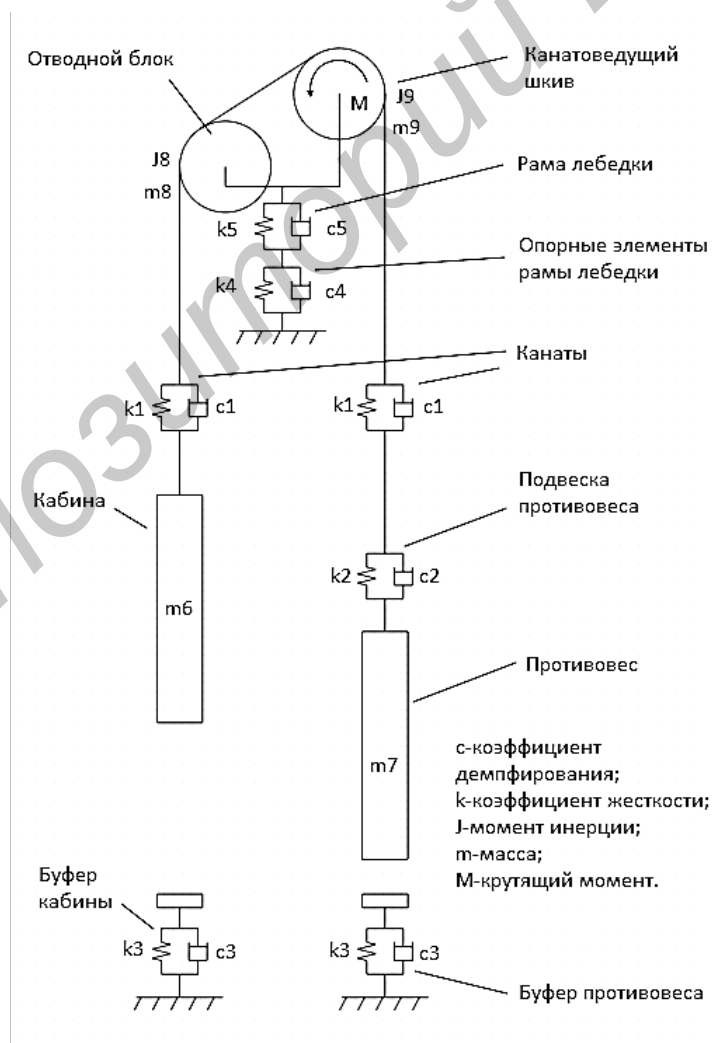


Рисунок 2. — Динамическая модель лифта

Данные для задания параметров жёсткости и демпфирования полиуретанового буфера в Adams были получены путем натурных испытаний в составе стенда и на разрывной машине.

В процессе сжатия буфера статическим нагружением определен график зависимости усилия от величины сжатия с учетом нелинейности (рисунок 3). Параметр демпфирования определялся в тестовой расчетной модели достижением максимального приближения кривой затухания скорости противовеса к реальному параметру (рисунок 4). Испытание заключалось в падении противовеса массой 755 кг под действием силы тяжести с высоты 67 мм (в соответствии с требованием п. 5.8.2.2.3 [2]).

Принятая величина демпфирования в Adams —  $4,6 \text{ Н} \cdot \text{с} / \text{мм}$ .

*Определение параметров жесткости и демпфирования тягового элемента (стального каната).* Стальной канат представляет собой сложную многокомпонентную систему, включающую спирально свитые металлические проволоки (рисунок 5).

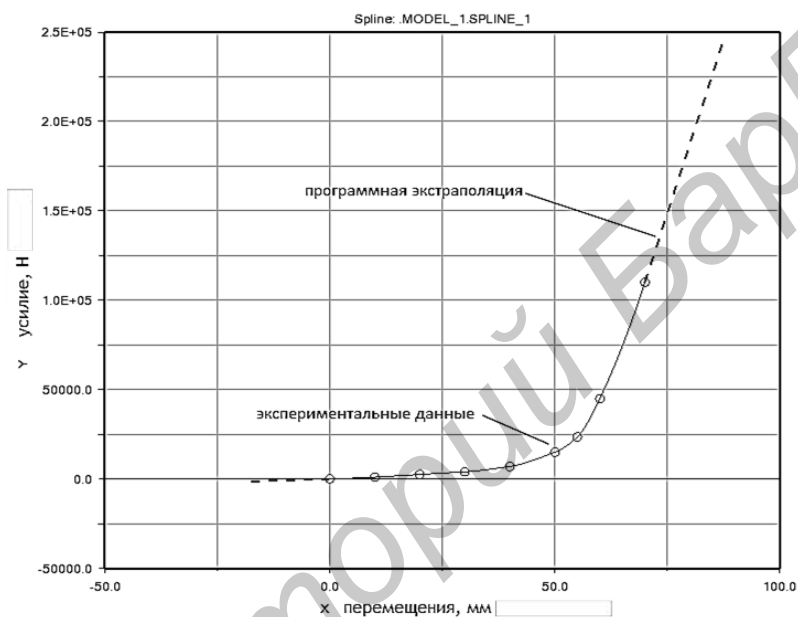


Рисунок 3. — График зависимости усилия от величины сжатия с учетом нелинейности

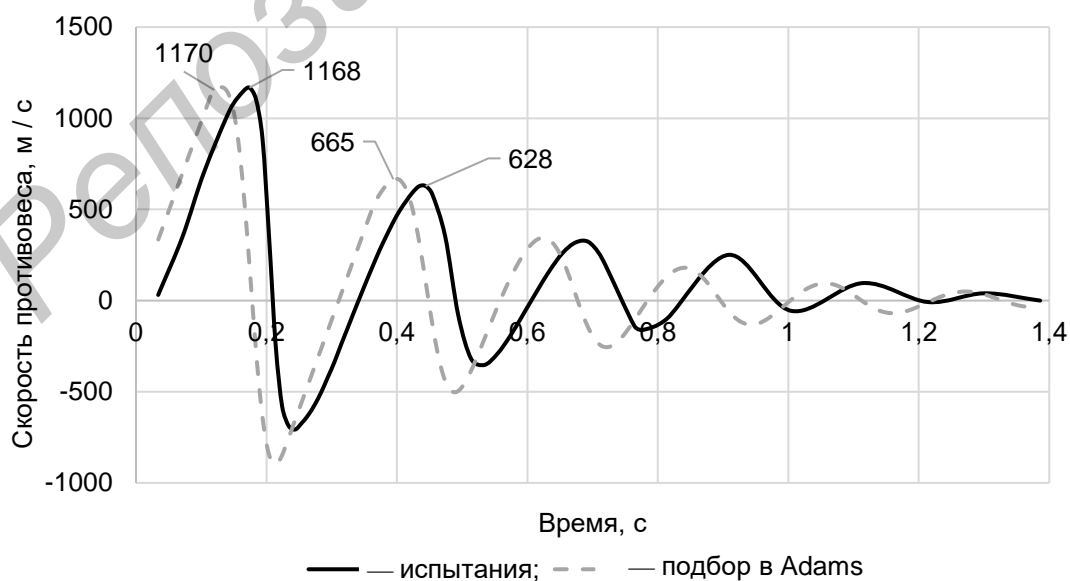


Рисунок 4. — Подбор параметра демпфирования буфера

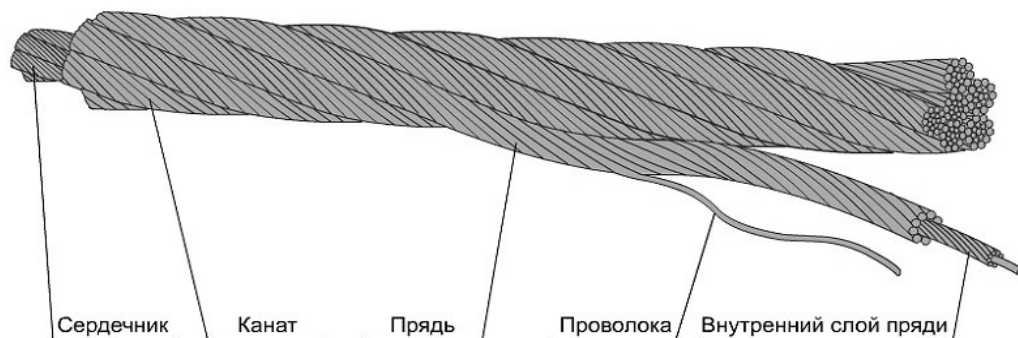


Рисунок 5. — Схема стального каната

В целях обеспечения безопасности движения лифта несущая способность каната и параметры его взаимодействия с приводом (канатоведущий шкив, далее — КВШ) строго регламентирована соответствующими стандартами [2—5]. Коэффициент запаса прочности каната для грузопассажирских лифтов должен быть не менее 12.

Основными параметрами каната для описания его массово-инерционных, механических свойств и контактного взаимодействия пары «канат—КВШ» в среде Adams являются модуль общей продольной упругости, приведенная плотность каната, коэффициент демпфирования (рисунок 6).

Канат работает в упругой зоне нагружения и, соответственно, характеристикой, определяющей жесткость элемента, является модуль продольной упругости. Вследствие многокомпонентности конструкции каната и применения органического и металлического сердечника расчетное определение значения модуля общей упругости является трудновыполнимой задачей. На данный момент не существует однозначного ее решения, применимо множество подходов к его определению [6; 7]. Наиболее точным, с нашей точки зрения, подходом является определение данной величины с использованием экспериментальных данных, приводимых изготовителями стальных канатов, и самостоятельно при наличии такой возможности. К данным, необходимым для определения модуля общей упругости металлической составляющей каната, относятся: масса погонного метра, величина эластичного удлинения при определенной величине усилия и диаметр каната.

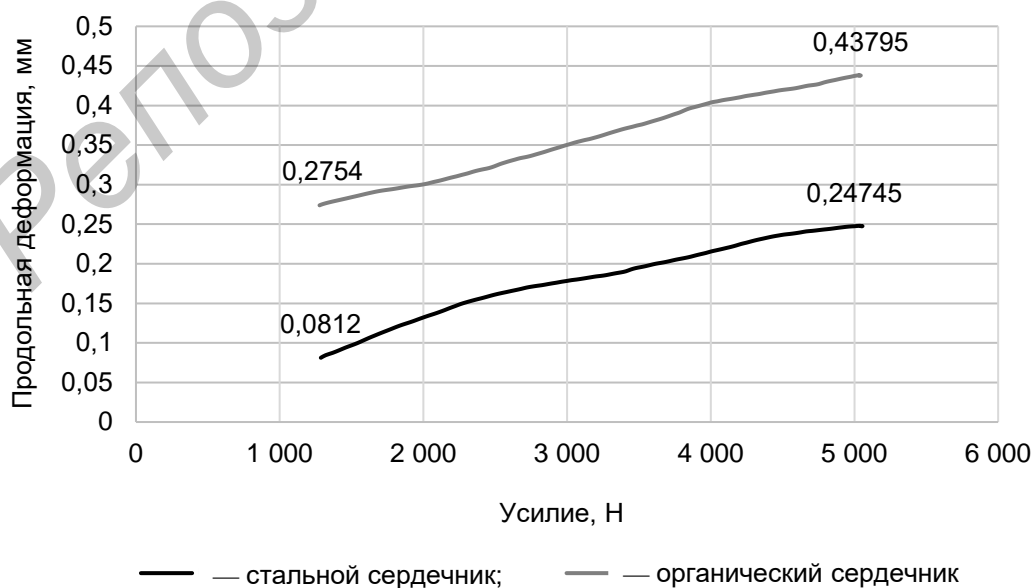


Рисунок 6. — График зависимости продольной деформации каната от усилия растяжения

Для определения общего модуля упругости на основании экспериментальных данных применим закон Гука по определению удлинения упругого стержня:

$$\Delta L = \frac{(F_{\text{исп}} - F_{\text{нач}})L}{E_{\text{кан}} A_{\text{ном}}} \rightarrow E_{\text{кан}} = \frac{(F_{\text{исп}} - F_{\text{нач}})L}{\Delta L A_{\text{ном}}},$$

где  $\Delta L$  — удлинение каната под действием нагрузки, мм;  
 $F_{\text{исп}}$  — величина усилия при определении относительного удлинения, Н;  
 $F_{\text{нач}}$  — величина предварительного натяжения, Н;  
 $L$  — базовая длина отрезка каната, мм;  
 $E_{\text{кан}}$  — модуль общей упругости каната, МПа;  
 $A_{\text{ном}}$  — номинальная площадь поперечного сечения, м<sup>2</sup>.

В таблице 1 приведены данные по величине модуля общей упругости на основании проведенных комплексных испытаний канатов Ø 8 мм с металлическим и органическим сердечником. На рисунке 6 приведены графики зависимости продольной деформации каната от усилия растяжения, найденные в ходе экспериментального определения модуля общей упругости.

Приведенная плотность каната определяется как

$$\rho_{\text{мат}} = \frac{q_{\text{метр}}}{10^3 A_{\text{ном}}},$$

где  $\rho_{\text{мат}}$  — плотность материала каната, кг / мм<sup>3</sup>;  
 $q_{\text{метр}}$  — масса погонного метра каната, кг / м.

Величина демпфирования каната принимается в процентном соотношении от жесткости вследствие переменной длины [8]. Численные значения модуля общей упругости получены на основе экспериментов, проведенных на разрывной машине (см. таблицу 1).

На рисунке 7 представлено окно задания параметров канатной системы с указанием вводимых расчетных значений характеристик тросовой системы.

Т а б л и ц а 1. — Результаты экспериментального определения модуля общей упругости тяговых лифтовых канатов 8 мм

Показатель	Канат с металлическим сердечником	Канат с органическим сердечником
Базовая длина отрезка каната $L$ , мм	100	100
Изменение усилия $F_{\text{исп}} - F_{\text{нач}}$ , Н	3 723,32	3 710,65
Удлинение $\Delta L$ , мм	0,16	0,17
Модуль упругости, МПа	48 992,17	44 980,77

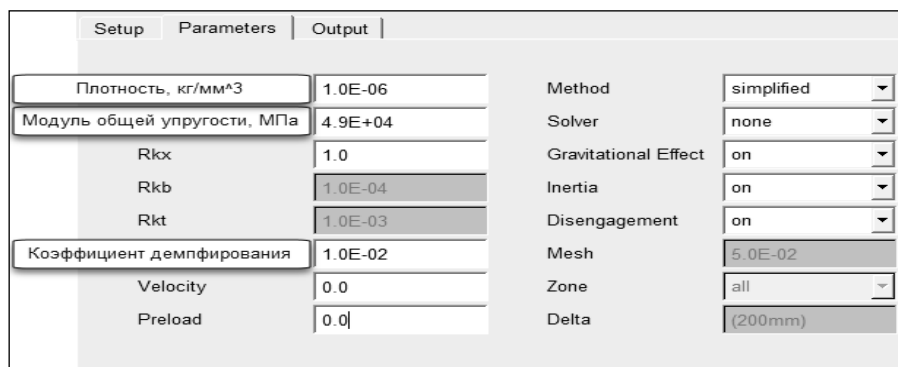


Рисунок 7. — Задание параметров каната в Adams

Определение приведенного коэффициента жесткости и демпфирования подвески противовеса. Подвеска кабины и противовеса является двухкомпонентной системой (пружина + элементы верхней балки).

В целях определения жесткости верхней балки проведен конечно-элементный анализ с определением величины деформации в вертикальном направлении под действием приложенного усилия (рисунок 8, б). В ходе проведенного анализа определена величина жесткости верхней балки с последующим определением приведенной жесткости путем рассмотрения пружины и элементов балки как последовательно соединенных упругих элементов. На рисунке 8, в, приведено определение приведенной жесткости на примере подвески противовеса лифта. Значение коэффициента демпфирования  $c$  принимаем табличное для материала металлических конструкций с соединением  $c = 0,05$  [9].

Определение приведенного коэффициента жесткости и демпфирования опорных элементов рамы лебедки. Жесткостные параметры определены по результатам расчетов в среде Ansys методом конечных элементов путем приложения целевого усилия 10 000 Н в вертикальном и горизонтальном направлениях с определением величины перемещения. Жесткость элемента определяем

$$C = F / \Delta,$$

где  $F$  — усилие, Н;  
 $\Delta$  — перемещение, мм.

В таблице 2 приведены результаты определения жесткости опорных элементов.

Значение коэффициента демпфирования  $\varepsilon$  принимаем табличное для материала резина  $c = 0,05$  [9].

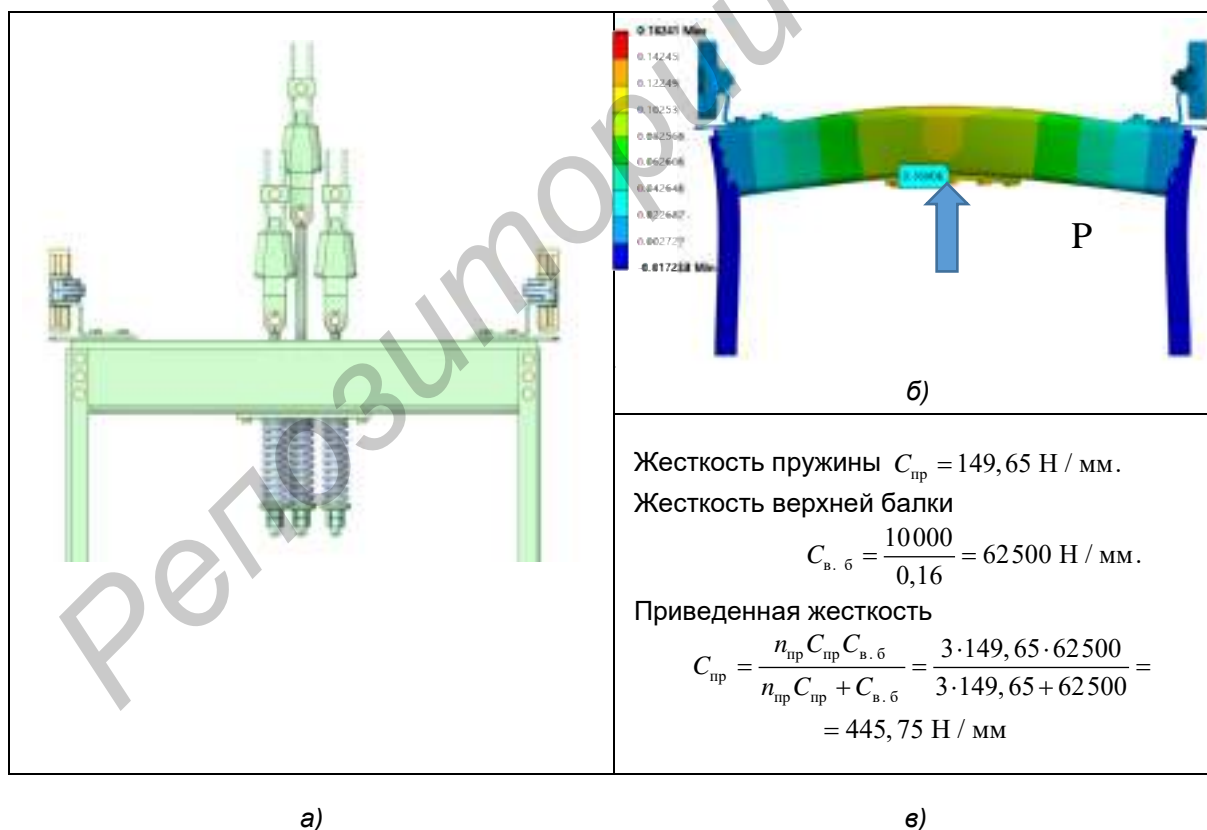


Рисунок 8. — Определение величины приведенной жесткости подвески противовеса

Т а б л и ц а 2. — Результаты определения жесткостных параметров

Направление усилия	Величина усилия, Н	Перемещение, мм	Жесткость, Н / мм
Вертикально	10 000	0,237	42 190
Горизонтально	10 000	1,08	9 260

*Задание рамы лебедки в Adams как упругого элемента.* Метод задания упругих свойств рамы лебедки созданием конечно-элементной модели выбран исходя из пространственной сложности конструкции и невозможности точно описать упругое поведение путем моделирования их простыми математическими элементами.

Задание поведения рамы как упругого элемента требует проведения модального анализа с определением частот собственных колебаний. Для моделирования упругого поведения рамы лебедки (общий вид представлен на рисунке 9) использовался модальный компонент, сгенерированный в системе Ansys, который был передан через модально нейтральный файл (\*.mnf) в систему Adams/View как упругое тело со своим набором собственных форм и частот. Для построения этого модального компонента использовалась трехмерная модель рамы лебедки в системе Ansys. При генерации модального компонента были записаны 20 мод собственных форм и частот. Число затребованных мод определяется из условия, чтобы эффективная масса (масса, участвующая в модальном анализе) составляла не менее 95 % от массы конструкции. Выбор Ansys в качестве программного продукта для генерации файла \*.mnf связан с наличием инструментов для более тонкой настройки конечно-элементной сетки, чем в системе Adams/View.

*Определение приведенного коэффициента трения рабочих тяговых элементов (пара «КВШ—канат»).* В соответствии с [5] величина приведенного коэффициента трения определяется в зависимости от формы канавки сопрягаемых поверхностей канатоведущего шкива и химико-термической обработки. В таблицах 3, 4 приведены основные зависимости по определению величины приведенного коэффициента трения с поясняющими рисунками.

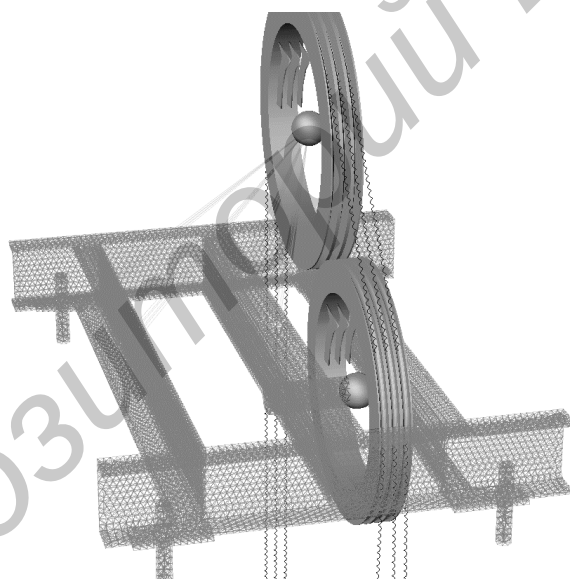
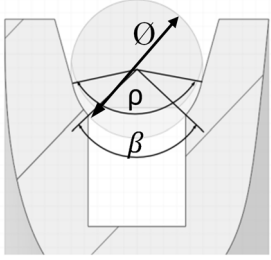


Рисунок 9. — Общий вид деформируемой рамы лебедки

Т а б л и ц а 3. — Канавка клиновая

Для канавок с материалом без упрочнения	Для канавок с упрочнением	
$f = \mu \frac{4(1 - \sin \frac{\beta}{2})}{\pi - \beta - \sin \beta},$	$f = \mu \frac{1}{\sin \frac{\gamma}{2}},$	
<p>где <math>f</math> — приведенный коэффициент трения;  <math>\mu</math> — коэффициент трения каната с материалом канавки;  <math>\beta</math> — угол подреза, рад;  <math>\gamma</math> — угол клиновой канавки, рад</p>		

Т а б л и ц а 4. — Канавка U-образная с подрезом

Для канавок с материалом без упрочнения	Для канавок с упрочнением	
$f = \mu \frac{4 \left( \sin \frac{\rho}{2} - \sin \frac{\beta}{2} \right)}{\rho - \beta + \sin \rho - \sin \beta},$ <p>где <math>\rho</math> — угол зоны контакта, рад</p>		

Расчетное подтверждение соответствия методики определения параметров рабочих тяговых элементов. В качестве подтверждения соответствия вышеприведенной методики определения параметров лифтового каната, величины приведенного коэффициента трения и вычислений в adams было выполнено сопоставление результатов испытания ограничителя скорости и расчетного эксперимента в Adams. Испытания проводились с ограничителем скорости на испытательном стенде, на котором имитировалось срабатывание ограничителя при превышении номинальной скорости движения кабины лифта. В качестве тягового элемента в ограничителе используется шкив с v-образной канавкой 40° с упрочнением (см. таблицу 3).

Определение приведенного коэффициента трения проводилось путем итерационных вычислений в Adams с обеспечением валидации расчетной модели и натурального эксперимента. На рисунках 10, 11 приведены графики сопоставления усилий протягивания и скорости перемещения каната.

Как следует из приведенных графиков, процент расхождения по усилию протягивания составил до 4 % в установившемся движении и скорости перемещения каната до 2,1 %, что характеризует приемлемое соответствие полученных результатов. При этом величина приведенного коэффициента трения, используемая в настройках канатной системы в расчетном эксперименте, составила 0,44.

Исходя из параметров таблицы 3, величина коэффициента трения материалов: стали (канат) — чугун (шкив)

$$\mu = f \sin \frac{\gamma}{2} = 0,44 \sin \frac{40}{2} = 0,15.$$

Ориентировочное значение коэффициента трения [10] для пары скольжения «сталь—чугун» в условиях смазки составляет 0,05...0,15, что подтверждает соответствие расчетной модели реальным процессам.

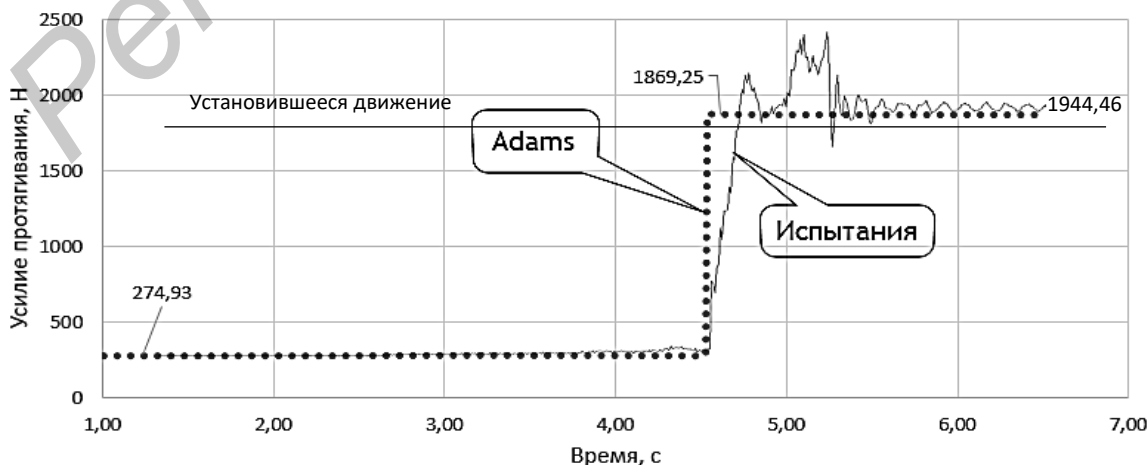
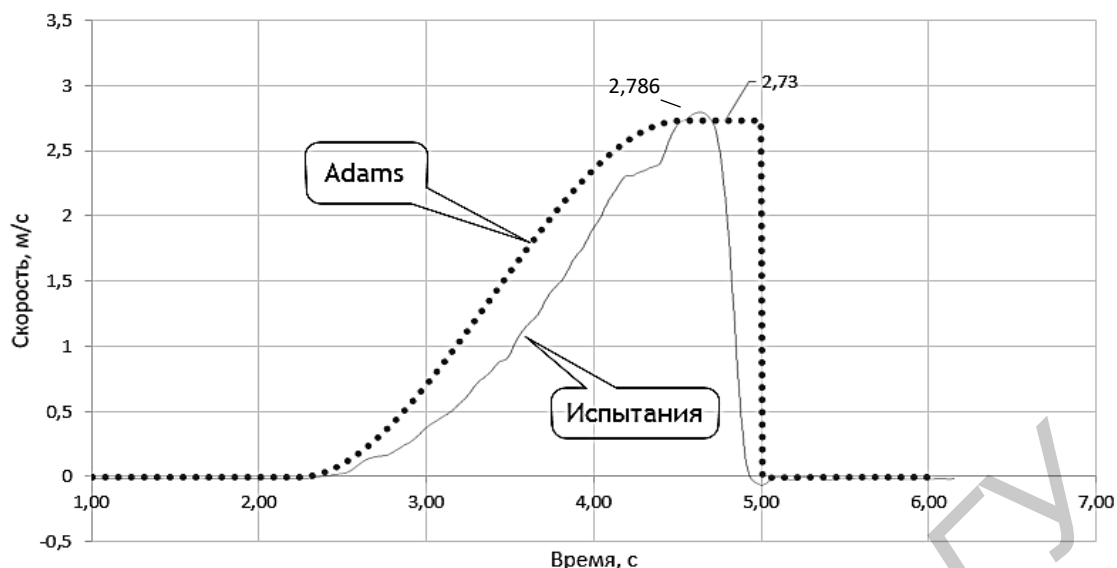


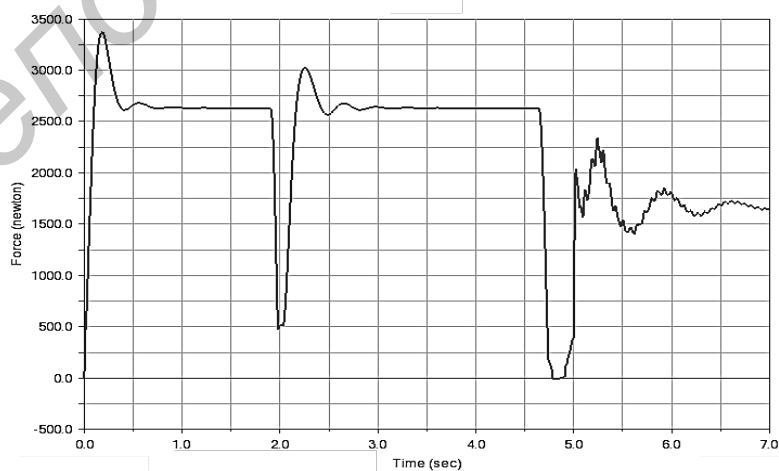
Рисунок 10. — Сопоставление результатов испытаний и расчетного эксперимента по усилию протягивания



**Рисунок 11. — Сопоставление результатов испытаний и расчетного эксперимента по скорости перемещения каната ограничителя скорости**

Моделирование работы лифта в среде Adams с оценкой влияния на динамические процессы рассматривания рамы лебедки как гибкого тела. Используя сформированные исходные данные, в модуле Adams/View была создана расчетная модель лифта грузоподъемностью 400 кг. Высота подъема — 20 м. Масса кабины с грузом — 955 кг, противовеса — 755 кг. Моделировалась аварийная ситуация, при которой кабина проезжает верхнюю посадочную площадку на скорости 115 % от номинальной (1,15 м/с) с последующей посадкой противовеса на буфер. Кабина и противовес заданы жесткими телами, имеющими ограничения поступательного шарнира, и соединены канатом тросовой системы. Подвеска противовеса смоделирована набором пружинных элементов. Канатоведущий шкив и отводной блок являются частью тросовой системы и закреплены посредством вращательных шарниров на упругой раме. Рама лебедки опирается через упругие опорные элементы рамы лебедки, которые смоделированы математической гибкой связью. Система приводится в движение приложением угловой скорости, равной линейной скорости движения кабины 1,15 м/с. В момент касания противовесом буфера вращение КВШ переходит в свободное.

График изменения усилия в пружине подвески противовеса представлен на рисунке 12.



**Рисунок 12. — График изменения усилия в пружине подвески противовеса**

Оценка влияния податливости рамы лебедки проводилась путем сравнения величин перемещения кабины и КВШ в вертикальном направлении в процессе моделирования расчетного случая посадки противовеса на буфер (рисунок 13).

Графики перемещения кабины лифта с жесткой и упругой рамой демонстрируют различие в абсолютных значениях перемещения около 1,2 мм. Различия в перемещениях на уровне рамы лебедки не превышают 0,8 мм.

На рисунке 14 приведен результат проведения вычислений колебательного процесса.

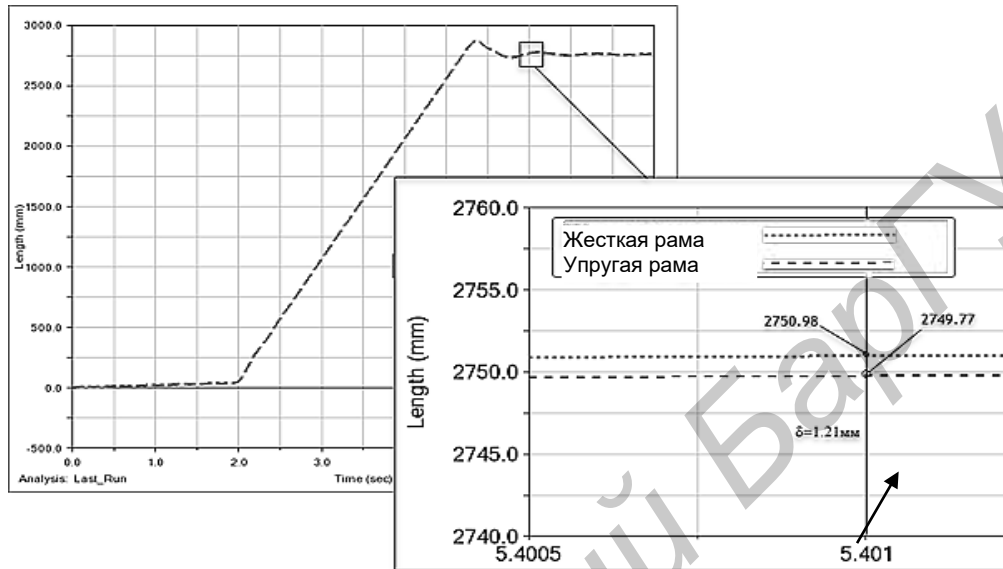


Рисунок 13. — Результаты проведенного расчета. График перемещения кабины лифта по вертикальной оси при посадке противовеса на буфер

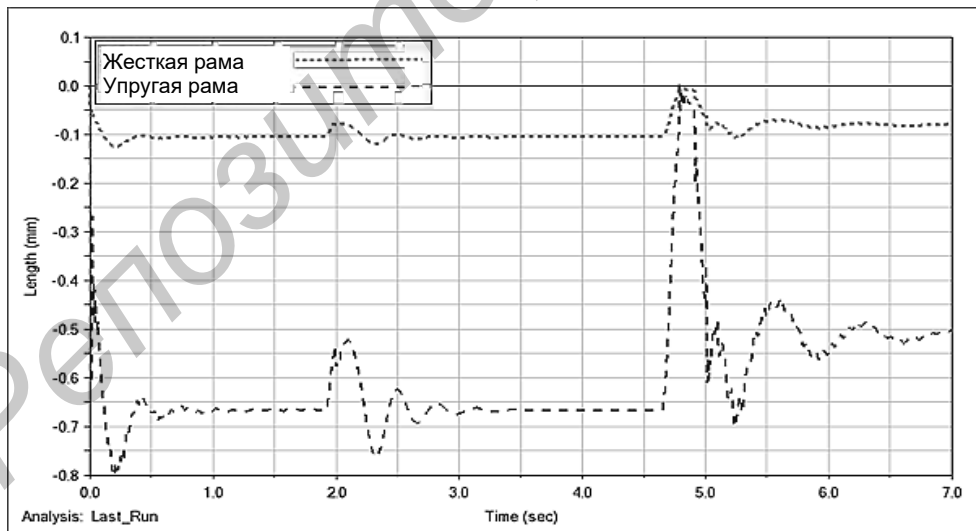


Рисунок 14. — Результаты проведенного анализа. Зависимость вертикального перемещения КВШ по вертикальной оси на раме лебедки при посадке противовеса на буфер

**Заключение.** В статье приведен подход к формированию математической модели лифта для анализа динамики его поведения с использованием экспериментального определения параметров для их задания в модели. Проанализировано влияние податливости рамы лебедки на возникающие перемещения КВШ, а также применимость аналитических формул определения приведенного коэффициента трения в паре «канат—канавка». Подход, описанный в статье, применим как для уже выпускаемых лифтов в целях их оптимизации, так и для новых на этапе их проектирования.

#### Список цитируемых источников

1. Руководство пользователя решателя Adams = Adams Solver User Guide Adams\_2021.0.2. — URL: [https://help-be.hexagonmi.com/bundle/Adams\\_2021.0.2\\_Adams\\_Solver\\_User\\_Guide/raw/resource/enus/Adams\\_-2021.0.2\\_Adams\\_Solver\\_User\\_Guide.pdf](https://help-be.hexagonmi.com/bundle/Adams_2021.0.2_Adams_Solver_User_Guide/raw/resource/enus/Adams_-2021.0.2_Adams_Solver_User_Guide.pdf) (date of access: 15.01.2026).
2. Лифты. Общие требования безопасности к устройству и установке. Лифты для транспортирования людей или людей и грузов = Lifts. General safety requirements for the construction and installation. Lifts for the transport of persons and persons and goods : ГОСТ 33984.1-2016 (EN 81-20:2014). — Взамен ГОСТ Р 53780-2010 ; введ. 22.11.2016. — М. : Стандартиформ, 2017. — 129 с.
3. Лифты. Термины и определения : ГОСТ 33605-2015 ; введ. впервые 10.12.2015. — М. : Стандартиформ, 2016. — 16 с.
4. Лифты. Правила и методы исследований (испытаний) и измерений при сертификации устройств безопасности лифтов. Правила отбора образцов : ГОСТ 33984.3-2017 (EN 81-50:2014) : введ. впервые 30.08.2017. — М. : Стандартиформ, 2017. — 40 с.
5. Лифты. Методы расчета основных несущих узлов лифта : ГОСТ 33984.4-2017 (EN 81-50:2014) : введ. впервые 01.11.2018. — М. : ФГУП «Стандартиформ», 2017. — 32 с.
6. Хацков, И. В. Модуль упругости каната закрытой конструкции / И. В. Хацков, Я. Ю. Молоканова // XXVI Региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области : сб. материалов конф., Волгоград, 16—28 нояб. 2021 г. — Волгоград : Волгогр. гос. техн. ун-т, 2022. — С. 134—136. — EDN ORLDGJ.
7. Гуревич, Л. М. Об особенностях расчета модуля упругости свитых конструкций / Л. М. Гуревич, В. Ф. Даненко // Известия Волгоградского государственного технического университета. — 2018. — № 9 (219). — С. 92—96. — EDN VAQKRQ.
8. Хальфин, М. Н. Модули упругости стальных канатов различных конструкций / М. Н. Хальфин, А. А. Шиббаев // Инновации в науке — инновации в образовании : материалы по итогам Междунар. науч.-техн. конф. «Интерстроймех-2013», Новочеркасск, 1—3 окт. 2016 г. — Новочеркасск : Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т (НПИ) им. М. И. Платова, 2013. — С. 45—46. — EDN VNYNQR.
9. Adams, V. Building Better Products with Finite Element Analysis / V. Adams, A. Askenazi. — Santa Fe, N. M. : OnWord Press, 1999.
10. Анурьев, В. И. Справочник конструктора-машиностроителя : в 3 т. / В. И. Анурьев ; под ред. И. Н. Жестковой. — Изд. 8-е, перераб. и доп. — Машиностроение, 2001. — Т. 1. — С. 75.

Поступила в редакцию 26.03.2026.

УДК 621.83+519.85

**А. В. Котов<sup>1</sup>,****Д. Г. Кроль<sup>2</sup>,** кандидат физико-математических наук, доцент<sup>1</sup>Открытое акционерное общество «Сейсмотехника», ул. Владимирова, 16, 246034 Гомель, Республика Беларусь, androsv@mail.ru<sup>1, 2</sup>Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», пр-т Октября, 48, 246029 Гомель, Республика Беларусь, kr-dmitry@gstu.by

## ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ СИНТЕЗ ПЛОСКИХ РЫЧАЖНЫХ МЕХАНИЗМОВ ПО УГЛУ ДАВЛЕНИЯ

В работе представлена методика оптимизационного синтеза плоского рычажного механизма на основе критерия ограничения максимального угла давления. Математическая модель кинематического исследования механизмов реализована с применением теории комплексных чисел и векторного анализа, что позволило компактно и эффективно определить выражения для положений и скоростей характерных точек, а также получить оригинальные аналитические зависимости для определения углов давления. Предложен алгоритм синтеза, базирующийся на ограничении угла давления, который показал свою высокую эффективность применения в современных математических пакетах. Выполнен оптимизационный синтез рычажного механизма, позволивший определить геометрические параметры механизма при обеспечении допустимых значений угла давления. Представлен пример реализации численного моделирования и решения задачи оптимизационного синтеза в математическом пакете PTC MathCAD.

**Ключевые слова:** синтез; угол давления; скорость; векторный анализ; теория комплексных чисел; рычажный механизм.

Рис. 4. Библиогр.: 16 назв.

**A. V. Kotov<sup>1</sup>,****D. G. Krol<sup>2</sup>,** PhD in Physics and Mathematics Sciences, Associate Professor<sup>1</sup>JSC “Seismotekhnika”, 16 Vladimirova Str., 246034 Gomel, the Republic of Belarus, androsv@mail.ru<sup>1, 2</sup>Institution of Education “Sukhoi State Technical University of Gomel”, 48 Oktyabrya Ave., 246029 Gomel, the Republic of Belarus, kr-dmitry@gstu.by

## OPTIMIZATION SYNTHESIS OF FLAT LEVER MECHANISMS BY PRESSURE ANGLE

This paper presents a methodology for the flat lever mechanism optimization based on a maximum pressure angle limitation criterion. A mathematical model for the kinematic study of the mechanisms is implemented using complex number theory and vector analysis, enabling a compact and efficient definition of expressions for the positions and velocities of characteristic points, as well as the generation of original analytical relationships for determining pressure angles. A synthesis algorithm based on a pressure angle limitation is proposed, which has proven highly effective in modern mathematical packages. An optimization synthesis of the lever mechanism has been performed, allowing determining of the mechanism's geometric parameters while ensuring permissible pressure angle values. An example of numerical modeling and solving an optimization synthesis problem in the PTC MathCAD mathematical package is presented.

**Key words:** synthesis; pressure angle; velocity; vector analysis; complex number theory; lever mechanism.

Fig. 4. Ref.: 16 titles.

**Введение.** Проблема обеспечения высокого КПД и надежности рычажных механизмов напрямую связана с минимизацией потерь в его кинематических парах, которые, в свою очередь, зависят от угла давления [1; 2]. Превышение угла давления от рекомендуемого оптимального значения приводит к увеличению потерь на трение и радиальных нагрузок в шарнирах рычажного механизма, что ведет к повышенному износу, заклиниванию и снижению общего КПД механизма [3].

Традиционно синтез механизмов по углу давления относится к задачам кинематического проектирования и решается графическими или аналитическими методами, включающими себя в себя построение планов положений и скоростей [4—6]. Такой синтез может

предшествовать силовому анализу и давать дополнительную качественную и количественную оценку о потенциальной силовой нагруженности исследуемого механизма. Однако постановка и решение такой задачи часто требует громоздких выкладок и графических построений, что затрудняет возможность проведения алгоритмизации и оптимизации [7].

Применение векторного анализа или теории комплексных чисел для описания кинематики плоских рычажных механизмов является хорошо зарекомендовавшим и эффективным подходом [8; 9]. Он позволяет единообразно, компактно и с минимальным числом аналитических выражений вычислять положения и скорости всех характерных точек и звеньев механизма. В то же время потенциал векторного анализа и комплексных чисел для решения задач кинематического синтеза, в частности оптимизации углов давления в шарнирах, раскрыт недостаточно полно. В связи с этим разработка методики оперативной оценки углов давления на этапе математического моделирования, основанной на этом аппарате, сохраняет свою научную и практическую актуальность.

Целью настоящего исследования является разработка методики оптимизационного синтеза плоского рычажного механизма по ограничению угла давления. Для достижения поставленной цели получены оригинальные аналитические зависимости для расчета угла давления, а также численные алгоритмы оптимизации.

**Материалы и методы исследования.** Для построения математической модели кинематического анализа плоского рычажного механизма использовался метод преобразования координат в неизменном базисе, реализованный с использованием как векторного анализа, так и теории комплексных чисел. В векторной модели углы давления в шарнирах рассчитывались через скалярное и векторное произведения, в модели с применением комплексных чисел — через аналогию этих произведений и аргумент комплексного числа. Для каждой математической модели применено несколько методик расчета углов давления в шарнирах.

На рисунке 1 представлена структурная группа рычажного механизма, в которой звено 1 принято за входное, а звено 2 — за выходное. Для упрощения расчетов при решении поставленной задачи пренебрегаем массами звеньев и трением в кинематических парах. На рисунке 1 показан угол давления  $\theta_B$  в шарнире  $B$ , вектор реакции связи  $R_{21}$  и вектор скорости  $v_B$  (с учетом принятых допущений направление реакции связи  $R_{21}$  будет совпадать с линией звена  $AB$ , что в итоге позволяет определить угол давления исключительно на основе кинематических параметров — радиуса-вектора звена и вектора скорости точки).

Наряду с углом давления часто рассматривается угол передачи  $\gamma_B$ , дополняющий угол  $\theta_B$  до  $90^\circ$  (см. рисунок 1). Поэтому оптимизационный синтез плоских рычажных механизмов может проводиться как по углу давления, так и по углу передачи [10; 11].

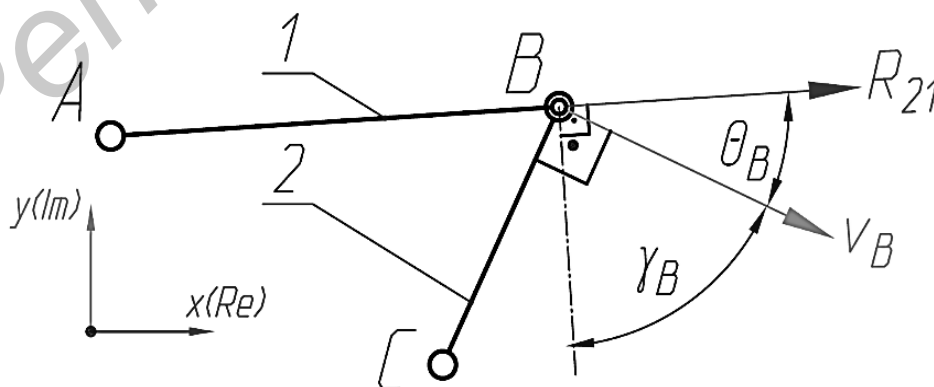


Рисунок 1. — Расчетная структурная группа рычажного механизма

Предлагаемый расчет углов давления в шарнирах механизма будет основан на использовании геометрического свойства скалярного и векторного произведений или их аналогов применительно к теории комплексных чисел. Поэтому все исходные кинематические параметры рычажного механизма (в зависимости от базы построения исходной математической модели) должны быть представлены в следующем общем виде:

$$\bar{r}_i = (r_i^x \quad r_i^y \quad 0)^T; \quad \bar{v}_i = (v_i^x \quad v_i^y \quad 0)^T \quad \text{или} \quad \underline{r}_i = r_i^x + jr_i^y; \quad \underline{v}_i = v_i^x + jv_i^y, \quad (1)$$

где  $r_i$  — радиус-вектор звена, вдоль которого действует реакция связи;  
 $v_i$  — вектор действительной скорости точки приложения реакции на ведомом звене;  
 $j$  — мнимая единица.

В данной работе, начиная с выражения (1), приняты следующие обозначения: верхнее подчеркивание соответствует геометрическому вектору, а нижнее — вектору комплексного числа.

Для первого способа вычисления угла давления воспользуемся геометрическим свойством скалярного произведения и его аналогом применительно к теории комплексных чисел:

$$\theta_i = \arccos\left(\frac{|\bar{r}_i \bar{v}_i|}{|r_i| |v_i|}\right) \quad \text{или} \quad \theta_i = \arccos\left(\frac{|\operatorname{Re}(\underline{r}_i \underline{v}_i^*)|}{|\underline{r}_i| |\underline{v}_i|}\right), \quad (2)$$

где  $\underline{v}_i^*$  — вектор комплексно сопряженного числа действительной скорости точки приложения реакции на ведомом звене;

$\operatorname{Re}$  — функция выделения действительной части комплексного числа.

Для второго способа вычисления угла давления воспользуемся геометрическим свойством векторного произведения и его аналогом применительно к теории комплексных чисел:

$$\theta_i = \arcsin\left(\frac{|\bar{r}_i \bar{v}_i|}{|r_i| |v_i|}\right) \quad \text{или} \quad \theta_i = \arcsin\left(\frac{|\operatorname{Im}(\underline{r}_i \underline{v}_i^*)|}{|\underline{r}_i| |\underline{v}_i|}\right), \quad (3)$$

где  $\operatorname{Im}$  — функция выделения мнимой части комплексного числа.

Третий способ вычисления угла давления заключается в делении выражения (3) на (2) с последующим применением арктангенса к полученному результату:

$$\theta_i = \operatorname{artg}\left(\frac{|\bar{r}_i \bar{v}_i|}{|\underline{r}_i \underline{v}_i|}\right) \quad \text{или} \quad \theta_i = \operatorname{arctg}\left(\frac{|\operatorname{Im}(\underline{r}_i \underline{v}_i^*)|}{|\operatorname{Re}(\underline{r}_i \underline{v}_i^*)|}\right). \quad (4)$$

Отметим, что в выражениях (2)...(4) в числителе используется модуль числа, вытекающий из необходимости определения угла давления как острого угла между направлением передачи реакции связи и направлением скорости приложения усилия (расчетный угол должен находиться в первом квадранте).

Четвертый способ определения угла давления применим исключительно к комплексным числам. Как отмечено в исследовании [9], математические модели плоских рычажных механизмов, построенные на основе аппарата комплексных чисел, эффективно определяют все угловые характеристики векторных величин через аргумент комплексного числа (например, угол ориентации вектора). Следовательно, для непосредственного вычисления угла давления можно использовать аргумент комплексного числа, что выражается следующей зависимостью:

$$\theta_i = \min(|\arg(\underline{v}_i) - \arg(\underline{r}_i)|, |\arg(\underline{v}_i) - \arg(\underline{r}_i)| - \pi), \quad (5)$$

где  $\arg$  — функция выделения аргумента комплексного числа.





Сформулируем задачу синтеза следующим образом: для заданного угла поворота ведущего звена (кривошипа) необходимо найти такой набор геометрических параметров звеньев механизма, при котором максимальные значения угла давления в шарнирах за полный оборот кривошипа не превышают заданного допустимого значения  $[\theta]$ .

Задаемся вектором оптимизируемых параметров, в качестве которых будут выступать все длины звеньев механизма, а также координаты одной неподвижной опоры:

$$\bar{p} = \{p_i\} = (L_{OA} \quad L_{AB} \quad L_{OB} \quad L_{OC} \quad L_{CD} \quad a \quad b)^T. \quad (6)$$

Вычисление углов давления в шарнирах проводим при помощи одного из выражений (2)...(5). В качестве целевой функции будет выступать условие минимизации максимальных значений углов давления для шарниров  $B$ ,  $C$  и  $D$ :

$$f(\bar{p}) = \sum C_i \sqrt{(\theta_i^{\max} - [\theta])^2} \rightarrow \min,$$

где  $C_i$  — весовой коэффициент угла давления, назначаемый индивидуально для каждого из шарниров, который предварительно принимается равным 1 и в зависимости от полученных результатов может «смягчаться» или «ужесточаться» для целевой функции.

Для определения максимального угла давления в каждом шарнире найдем производную от  $\theta(\varphi)$  по обобщенной координате и приравняем его нулю. Полученное уравнение решаем численным методом (например, с помощью математического пакета РТС MathCAD) и находим угол кривошипа ( $\varphi$ ), соответствующий максимальному углу давления, а затем и численное значение угла давления (см. рисунок 3, блок 5 на схеме).

Поиск оптимальных значений для вектора оптимизируемых параметров (6) ограничим следующим диапазоном чисел от их исходных значений:

$$p_i \in [0, 2p_i^*; 2p_i^*],$$

где  $p_i^*$  — исходные значения  $i$ -го элемента вектора оптимизируемых параметров.

Для обеспечения условия существования кривошипа дополнительно наложим на рассматриваемый рычажный механизм ограничения в виде теоремы Грасгофа [3; 15], согласно которой наименьшее звено является кривошипом, если сумма длин наименьшего и любого другого звена меньше суммы длин остальных двух звеньев:

$$p_0 + \sqrt{p_5^2 + p_6^2} < p_1 + p_2; \min(p_0, p_1, p_2, \sqrt{p_5^2 + p_6^2}) - p_0 = 0.$$

Дальнейшее решение задачи кинематического синтеза проводится с помощью одного из известных оптимизационных алгоритмов [16]. Для решения поставленной задачи кинематического синтеза был применен численный метод оптимизации, реализованный с помощью встроенной функции минимизации в математическом пакете РТС MathCAD. Результатом вычислений стал следующий оптимальный набор геометрических параметров механизма:

$$\bar{p}_{mcd} = (0,03 \quad 1,139 \quad 0,595 \quad 0,307 \quad 1,144 \quad 0,546 \quad 0,668)^T \text{ м.}$$

На рисунке 2, б, приведена кинематическая схема синтезированного механизма, а на рисунке 4, б, изображены графики зависимости изменения угла давления в его шарнирах. Как видно из полученных результатов, новые значения углов давления не превышают принятого допустимого значения во всем диапазоне угла поворота ведущего звена. Для синтезированного механизма расчетные значения максимального угла давления в шарнирах  $B$ ,  $C$ ,  $D$  составили, соответственно,  $\theta_B = 44,8^\circ$ ,  $\theta_C = 44,9^\circ$  и  $\theta_D = 14,1^\circ$ , что удовлетворяет заданному ограничению по допустимому углу  $[\theta]$ .

Однако следует учитывать, что ужесточение конструктивных ограничений в процессе кинематического синтеза на геометрические параметры рычажного механизма может сделать недостижимым одновременную оптимизацию углов давления во всех шарнирах. Если механизм имеет рабочий и холостой (с меньшими нагрузками) ходы, можно для холостого хода принять несколько большие величины для  $[\theta]$ . Поэтому синтез механизма — всегда поиск рабочего компромисса между условием обеспечения значений углов давления в допустимых пределах и выбором геометрических параметров, соответствующих требованиям конструкции.

**Заключение.** Разработана и реализована методика кинематического оптимизационного синтеза плоского шарнирного механизма, направленная на обеспечение заданного ограничения по максимальному углу давления в его шарнирах. В основе предложенной методики расчета углов давления лежат оригинальные аналитические зависимости, полученные с использованием геометрического свойства скалярного и векторного произведений или их аналогии применительно к комплексным числам, а также аргумента комплексного числа. Предложенный алгоритм и проведенный по нему вычислительный эксперимент подтвердили работоспособность метода. Разработанный подход может предшествовать проведению силового анализа, а также рекомендован для использования в инженерной практике при проектировании рычажных механизмов, к которым предъявляются повышенные требования по КПД, износу и отсутствию заклинивания.

#### Список цитируемых источников

1. Артоболевский, И. И. Теория механизмов и машин : учеб. для вузов / И. И. Артоболевский. — 4-е изд., перераб. и доп. — М. : Наука, 1988. — 640 с.
2. Теория механизмов и машин : учеб. пособие для вузов по машиностроит. специальностям / М. З. Котовский [и др.]. — 2-е изд., испр. — М. : Академия, 2008. — 460 с.
3. Теория механизмов и машин. Анализ, синтез, расчет / Ю. Ф. Лачуга, А. М. Баусов, А. Н. Воскресенский [и др.]. — 3-е изд. — М. : ИКЦ Колос-с, 2020. — 416 с.
4. Евдокимов, Ю. И. Углы давления в двухпорных механизмах с четырехзвенной трехповодковой структурной группой / Ю. И. Евдокимов // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). — 2011. — № 2 (18). — С. 109—112.
5. К определению углов давления и критериев качества передачи движения в рычажных механизмах IV класса с остановками выходного звена по заданным циклограммам / В. С. Хорунжин, В. А. Бакшеев, А. Н. Шариков [и др.] // Омский научный вестник. — 2008. — № 1 (64). — С. 27—30.
6. Гебель, Е. С. Проектирование рычажных механизмов высокоточного позиционирования / Е. С. Гебель, В. Г. Хомченко. — Омск : ОмГТУ, 2014. — 136 с.
7. Galabov, V. Synthesis of Four-Bar Linkages by Four Infinitely Close Relative Positions and Pressure Angle / V. Galabov, R. Roussev, Bl. Paleva-Kadiyska // El-Cezeri Journal of Science and Engineering. — 2023. — 10 (2). — P. 401—408.
8. Котов, А. В. Анализ уравновешенности кривошипно-ползунного механизма привода режущего аппарата методом векторов главных точек / А. В. Котов // Тракторы и сельхозмашины. — 2024. — Т. 91, № 2. — С. 167—180. — DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-606653>.
9. Котов, А. В. Способ и программная реализация кинематического анализа кулисного механизма / А. В. Котов, Д. Г. Кроль // Механика машин, механизмов и материалов. — 2025. — № 4 (73). — С. 25—30. — DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-4-73-25-30>.
10. Гордиенко, Э. Л. Определение геометрических параметров плоского рычажного механизма и их влияние на углы давления / Э. Л. Гордиенко, Д. С. Рудской // Машинознавство : матеріали 8-ої Регіон. наук.-метод. конф., Донецьк, 29—31 марта 2006 г. — Донецьк : ДонНТУ, 2006. — С. 44—48.
11. Белецкий, В. Я. Расчет механизмов машин-автоматов пищевых производств. — Киев : Вища шк., 1974. — 228 с.
12. Бертяев, В. Д. Теоретическая механика на базе MathCAD : практикум / В. Д. Бертяев. — СПб. : БХВ-Петербург, 2005. — 734 с.
13. Кініцький, Я. Т. Теорія механізмів і машин / Я. Т. Кініцький. — Київ : Наук. думка, 2002. — 660 с.
14. Гавриленко, В. А. Теория механизмов и машин : учеб. пособие / В. А. Гавриленко. — М. : Высш. шк., 1983. — 420 с.
15. Теория механизмов и механика машин : учеб. для вузов / К. В. Фролов, С. А. Попов, А. К. Мусатов [и др.] ; под ред. К. В. Фролова. — 5-е изд., стер. — М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. — 664 с.
16. Гальченко, В. Я. MathCAD: математические методы и инструментальные средства оптимизации / В. Я. Гальченко, Р. В. Трёмбовецкая. — Черкассы : ЧП Гордиенко Е. И., 2018. — 516 с.

Поступила в редакцию 26.03.2026.

УДК 621.98.044.7

**А. Н. Матяс**

Государственное научное учреждение «Физико-технический институт  
Национальной академии наук Беларуси», ул. Академика Купревича, 10, 220084 Минск,  
Республика Беларусь, a.matsias@phti.by, priemnaya@phti.by

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛИ 40X13 И СПЛАВА VT6 ПРИ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

В работе исследованы механизмы упрочнения стали 40X13 и титанового сплава VT6 при магнитно-импульсном воздействии на плоском и цилиндрическом индукторах. Установлено, что основным силовым фактором процесса является амплитудное магнитное давление  $p$ .

Для оценки напряженно-деформированного состояния металла проведен расчет пикового (динамического) ударного давления  $p_{\text{пик}}$ . Исследования позволяют предположить, что при достижении значений около 100 МПа для стали 40X13 и 876 МПа для сплава VT6 могут возникать микросдвиги в кристаллической решетке, увеличивающие плотность дислокаций без превышения макроскопического предела текучести (450 МПа для стали 40X13 и 800...900 МПа для сплава VT6). Особое внимание уделено роли магнитной индукции, которая через относительную магнитную проницаемость  $\mu_r$  определяет глубину проникновения электромагнитного поля и эффективность деформационного упрочнения. На основании полученных зависимостей предложена методика расчета суммарного статического усилия при магнитно-импульсной обработке, что позволит оптимизировать режимы обработки для исследуемых материалов. Определено влияние величины технологического зазора  $a$  между индуктором и образцом на величину давления  $p$ , построена графическая зависимость. Введение в расчетную схему динамического коэффициента и определение пикового ударного усилия позволяют более точно прогнозировать отклик кристаллической структуры на кратковременный импульс.

**Ключевые слова:** магнитно-импульсное упрочнение; сталь 40X13; сплав VT6; магнитное давление; пиковое давление; магнитная индукция; статическое усилие; глубина проникновения.

Рис. 4. Библиогр.: 4 назв.

**A. N. Matsias**

State Scientific Institution "Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus",  
10 Academician Kuprevich Str., 220084 Minsk, the Republic of Belarus, a.matsias@phti.by, priemnaya@phti.by

## MODELING OF THE STRESS-STRAIN STATE OF 40X13 STEEL AND VT6 ALLOY UNDER MAGNETIC-IMPULSE INFLUENCE

The paper investigates the strengthening mechanisms of 40Kh13 steel and VT6 titanium alloy under magnetic pulse treatment using flat and cylindrical inductors. It has been established that the peak magnetic pressure  $p$  is the primary driving force of the process.

To evaluate the stress-strain state of the metal, the peak (dynamic) impact pressure  $p_{\text{пик}}$  has been calculated. The studies suggest that reaching values of approximately 100 MPa for 40Kh13 steel and 876 MPa for VT6 alloy can induce micro-slips in the crystal lattice. These micro-slips increase dislocation density without exceeding the macroscopic yield strength (450 MPa for 40Kh13 and 800...900 MPa for VT6). Particular attention has been paid to the role of magnetic induction, which, through relative magnetic permeability  $\mu_r$ , determines the penetration depth of the electromagnetic field and the strain hardening efficiency. Based on the obtained correlations, a method for calculating the total static force during MPT has been proposed. A graphical dependence of pressure  $p$  on the technological gap  $a$  between the inductor and the work piece to optimize processing parameters has been developed. The dynamic coefficient introduction into the calculation scheme and the determination of the peak impact force make it possible to predict more accurately the crystal structure response to the corresponding impulse.

**Key words:** magnetic pulse treatment; 40Kh13 steel; VT6 alloy; magnetic pressure; peak pressure; magnetic induction; total static force; penetration depth.

Fig. 4. Ref.: 4 titles.

**Введение.** Современное машиностроение предъявляет высокие требования к эксплуатационным характеристикам деталей, работающих в условиях интенсивного износа и циклических нагрузок. Особое место среди конструкционных материалов занимают высоко-

хромистые стали, такие как 40X13, и титановые сплавы типа ВТ6, сочетающие высокую коррозионную стойкость с механической прочностью, которые широко востребованы в авиастроении, медицине и энергетическом машиностроении благодаря уникальному сочетанию своих свойств. Однако эксплуатация изделий из данных материалов в условиях знакопеременных нагрузок требует создания модифицированного поверхностного слоя с повышенной плотностью дефектов кристаллической структуры, что традиционно достигается методами поверхностного пластического деформирования.

Одним из наиболее перспективных методов модификации структуры поверхностных слоев является упрочнение магнитно-импульсной обработкой (далее — МИО). В отличие от традиционной пластической деформации, МИО позволяет инициировать микропластические процессы на уровне кристаллической решетки, увеличивая плотность дислокаций при сохранении макроскопической целостности детали [1; 2].

Схематично принцип действия магнитного поля, используемого для процесса обработки образцов в цилиндрическом и на плоском индукторе, показан на рисунке 1 [3; 4].

Линии магнитной индукции проходят через образец, вызывая микроскопические изменения в микроструктуре образцов. Согласно закону электромагнитной индукции Фарадея, подача тока возбуждения в рабочую катушку приводит к генерации индуцированного тока в образце, расположенном внутри (цилиндрическая схема) или на поверхности (плоская схема) индуктора. Вследствие скин-эффекта наведенный ток концентрируется в поверхностном слое металла, при этом плотность тока возрастает при уменьшении рабочего зазора между катушкой и заготовкой. Возникающее интенсивное магнитное давление, обусловленное взаимодействием тока возбуждения и индуцированного тока, обеспечивает упрочняющее воздействие на металлическую поверхность. При проектировании процессов МИО металлов необходимо знать распределение давления магнитного поля на поверхность заготовки. Зная величину давления магнитного поля, можно определить нагруженно-деформационное состояние упрочняемых изделий и другие технологические характеристики [5; 6].

Научная значимость исследования заключается в необходимости детального математического и физического описания силового взаимодействия для материалов с принципиально разной природой: ферромагнитной стали 40X13 и парамагнитного сплава ВТ6. Различие в их относительной магнитной проницаемости и электропроводности диктует разные условия проникновения электромагнитной волны и распределения давления по глубине слоя.

В данной работе обоснована критическая важность расчета таких параметров, как амплитудное магнитное давление  $p$  и пиковое (динамическое) ударное давление  $p_{\text{пик}}$ . Введение в расчетную схему динамического коэффициента и определение пикового ударного усилия позволяют более точно прогнозировать отклик кристаллической структуры на кратковременный импульс.

Целью работы является установление физических закономерностей процесса МИО при использовании плоских и цилиндрических индукторов. Основное внимание уделено выявлению зависимости магнитного давления от величины технологического зазора  $a$  и разработке комплексной методики расчета суммарного статического усилия. Полученные результаты позволяют научно обосновать выбор энергетических режимов обработки, обеспечивающих требуемый уровень упрочнения за счет контролируемого роста плотности дислокаций.

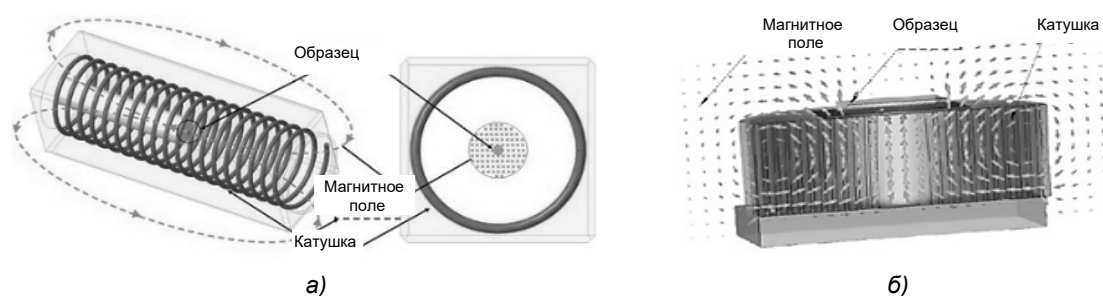


Рисунок 1. — Принцип действия обработки импульсным магнитным полем

**Материалы и методы исследования.** В роли объектов исследования выступают материалы с принципиально различными электрофизическими и механическими свойствами: высокохромистая сталь 40X13 и титановый сплав ВТ6.

Известно, что разный химический состав исследуемых сплавов и процент содержания в них легирующих добавок очень сказываются на величине электрического удельного сопротивления  $\rho$ . Углеродистые и низколегированные стали в несколько раз лучше проводят электрический ток, чем высоколегированные и жаропрочные стали, которые имеют высокое содержание никеля и хрома. У парамагнетиков электрическое удельное сопротивление  $\rho$  на порядок выше, чем у ферромагнетиков.

Для моделирования и проведения экспериментальной МИО задействовано технологическое оборудование на базе магнитно-импульсных установок МИП-18 и МИУ-3. Моделирование силового воздействия проводилось для двух типов рабочих органов — индукторов. Для исследований и обработки плоских образцов из коррозионно-стойкой стали 40X13 использовали плоский индуктор диаметром 150 мм с медной шиной и изоляционным слоем. Спираль этого индуктора содержит 18 витков, его индуктивность — 25,8 мкГн, значение напряженности магнитного поля  $H$  при МИО составляет  $2,793 \cdot 10^6$  А/м. Для обработки цилиндрических образцов из титанового сплава ВТ6 использовали цилиндрический индуктор  $\varnothing 10,5$  мм с длительностью импульса 147 мкс и частотой, равной 6,8 кГц.

**Результаты исследования и их обсуждение.** 1. Основным силовым фактором процесса является амплитудное магнитное давление  $p$ , возникающее в результате взаимодействия полей. Величина этого давления прямо пропорциональна квадрату плотности магнитного потока  $B$ .

Точный расчет распределения магнитного давления по поверхности позволяет прогнозировать напряженно-деформированное состояние изделия и оптимизировать технологические параметры упрочнения [7]:

$$p = \frac{B^2}{2\mu_0} = \frac{\mu_0 H^2}{2} = \frac{4\pi 10^{-7} (2,793 \cdot 10^6)^2}{2} \approx 4,9 \cdot 10^6 \text{ Па (4,9 МПа)}, \quad (1)$$

где  $B$  — магнитная индукция;  
 $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  Гн/м — магнитная постоянная;  
 $H$  — напряженность магнитного поля.

2. Оценка напряженно-деформированного состояния металла при магнитно-импульсном воздействии требует расчета пикового (динамического) ударного давления  $p_{\text{пик}}$ . Ввиду микросекундного диапазона нарастания импульса  $\mu_s$ , инерционные силы материала препятствуют мгновенному макросмещению объемов металла, что вызывает резкий скачок внутренних напряжений в поверхностном слое.

Для учета динамических эффектов и специфики физико-механических свойств стали 40X13 вводится коэффициент динамичности  $K_{\text{дин}}$ . При принятых технологических режимах обработки значение принимается равным 20. Это позволяет адекватно оценить амплитуду ударной волны, проникающей вглубь металла, и рассчитать итоговый эффект упрочнения [8]:

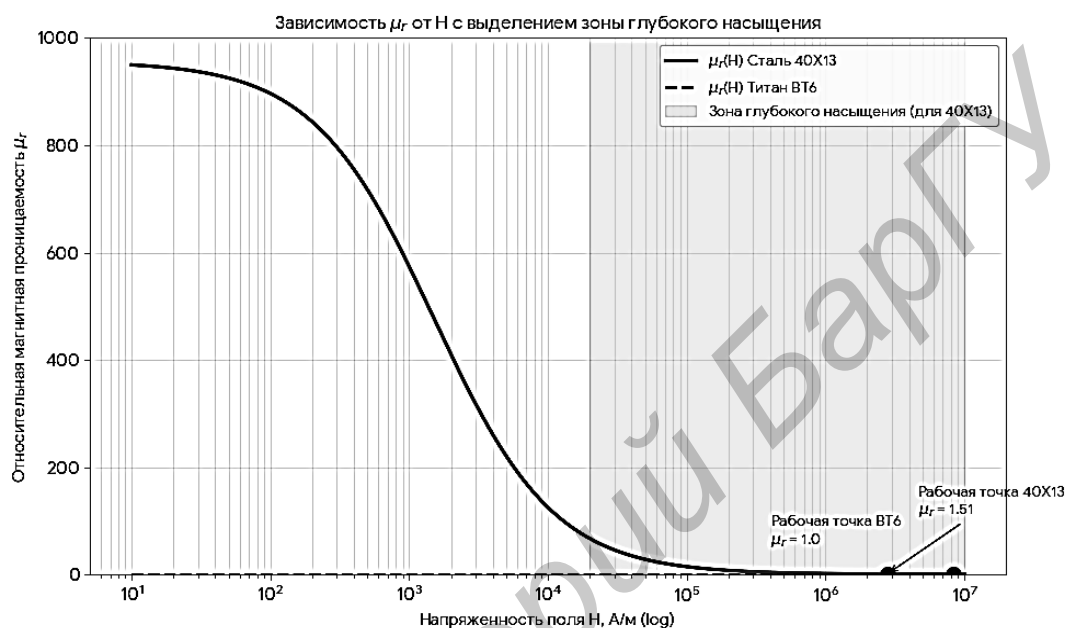
$$p_{\text{пик}} = pK_{\text{дин}} = 4,9 \cdot 10^6 \cdot 20 \approx 97,8 \text{ МН}.$$

Именно это значение (почти 1 000 атм.) ответственно за упрочнение. Оно создает микродвиги в кристаллической решетке, позволяет увеличивать плотность дислокаций, хотя и не достигает макроскопического предела текучести: 450 МПа — для стали 40X13, 800...900 МПа — для сплава ВТ6.

3. Магнитная индукция, в свою очередь, связана с напряженностью поля через относительную магнитную проницаемость материала  $\mu_r$  [9]:

$$B = \mu_0 \mu_r H. \quad (2)$$

Кроме того, следует учитывать, что магнитная проницаемость материала  $\mu_0$  меняется в зависимости от величины напряженности магнитного поля  $H$ . На рисунке 2 представлен график и физическое объяснение того, что происходит с материалами (40X13 и ВТ6) при сверхвысоких полях.



**Рисунок 2. — Зависимость магнитной проницаемости материала  $\mu_r$  от напряженности магнитного поля  $H$  коррозионно-стойкой стали 40X13 и титанового сплава ВТ6**

Для коррозионно-стойкой стали 40X13 значение магнитной проницаемости значительно выше единицы (в слабых полях она может достигать 600...800), однако при воздействии магнитного поля с экстремально высокой напряженностью, как в нашем случае, любой ферромагнетик находится в состоянии глубокого технического насыщения. При очень высоких значениях поля ( $H > 10^5$  А/м) намагниченность  $M$  достигает своего предела и перестает расти. В этом случае относительная магнитная проницаемость  $\mu$  стремится к единице ( $\mu \rightarrow 1$ ). Для ферромагнитных материалов (сталь 40X13) зависимость имеет нелинейный характер и описывается кривой Столетова. Для парамагнетиков (титан ВТ6) эта величина — константа ( $\mu = 1$ ). Тогда выражение (2) будет иметь следующий вид [7; 9]:

$$B = \mu_0 H = 1,26 \cdot 10^6 \cdot 2,793 \cdot 10^6 = 3,5 \text{ Тл}. \quad (3)$$

Поскольку сталь 40X13 является ферромагнетиком, расчет разделяется на два этапа: определение индукции в зазоре (рабочее поле) и в самом материале. Внутри самого металла индукция теоретически должна быть выше  $B = \mu_0 H$ . Однако здесь вступают в силу два фактора:

1) насыщение — для большинства сталей техническое насыщение  $B$  наступает при значениях 1,8...2,2 Тл [10];

2) сверхсильные поля — полученное значение 3,51 Тл уже значительно превышает предел насыщения стали. Это означает, что материал «перенасыщен», дальнейший рост индукции идет почти как в вакууме, но с добавлением намагниченности насыщения железа.

Реальное значение индукции в поверхностном слое [7]

$$B_{\text{реал}} = B + J_s = 3,51 + 1,8 = 5,31 \text{ Тл},$$

где  $J_s$  — намагниченность насыщения для стали 40X13;  $J_s \approx 2,0$  Тл.

4. Согласно результатам проведенного ранее моделирования для стального ножа, площадь воздействия на инструмент при варианте размещения изделия «кромка за середину» составит  $120 \text{ см}^2$ . Следовательно, расчет суммарного статического усилия  $F$  при МИО [11]

$$F = pS = 4,9 \cdot 10^6 \cdot 0,012 \approx 58,8 \text{ кН},$$

где  $S$  — площадь обрабатываемой поверхности инструмента.

5. Расчет динамического коэффициента и пикового ударного усилия. Особенностью МИО является крайне малая длительность импульса (45 мкс) и высокая крутизна нарастания тока. В таких условиях нагружение носит ударный характер. Пиковое (мгновенное) суммарное усилие в момент удара [10]

$$F_{\text{пик}} = FK_{\text{дин}} = 58,8 \cdot 10^3 \cdot 20 \approx 1176 \text{ кН} (1,18 \text{ МН}).$$

В техническом эквиваленте это соответствует мгновенному удару силой около 120 т. Сочетание высокой плотности вихревых токов ( $7,9 \cdot 10^8 \text{ А / м}^2$ ) и экстремальной индукции (5,31 Тл) генерирует значительные объемные силы Лоренца ( $f = jB$ ). Данный фактор в совокупности с ударным давлением и кратковременным адиабатическим нагревом обеспечивает превышение порога микропластичности. Это приводит к интенсивному размножению дислокаций, их закреплению на выделениях карбидной фазы и формированию благоприятных сжимающих остаточных напряжений в приповерхностном слое.

Рассмотрим случай обработки в цилиндрическом индукторе образцов из титанового сплава ВТ6, который относится к парамагнетикам — материалам, имеющим низкую магнитную проницаемость ( $\mu = 1$ ). В многовитковом соленоиде напряженность поля прямо пропорциональна числу витков  $n$  и току  $I$ :

$$H = \frac{In}{L} = \frac{16 \cdot 31400}{0,06} \approx 8,4 \cdot 10^6 \text{ А / м}.$$

Согласно формуле (3), индукция магнитного поля  $B$  составит 10,5 Тл, с учетом зазора — порядка 11,5 Тл. За счет того, что титан является парамагнетиком, значение индукции на его поверхности не увеличивается за счет магнитных свойств материала, как в случае со сталью 40X13, а остается равным полю индуктора. Тогда удельное магнитное давление, которое радиально сжимает титановый образец в момент пиков тока, при подстановке в уравнение (1) будет составлять порядка 43,8 МПа, а пиковое ударное давление  $p_{\text{пик}} = 876 \text{ МПа}$ .

На боковую поверхность прутка площадью  $S = 18,8 \text{ см}^2$  действует суммарная сила:

а) статическое усилие:  $F = 82,8 \text{ кН}$ ;

б) динамическое усилие: длительность 147 мкс при 6,8 кГц соответствует одному полному периоду колебаний. С учетом ударного нарастания поля пиковое мгновенное усилие  $F_{\text{пик}} = 1,65 \text{ МН} (\approx 170 \text{ т})$ .

Для завершения физической картины процесса наложим кривую магнитной индукции  $B$  на график напряженности  $H$ . Это позволит на рисунке 3 увидеть ту самую точку «потолка», после которой сталь 40X13 перестает намагничиваться и начинает вести себя как «пустое пространство» (аналогично титану).

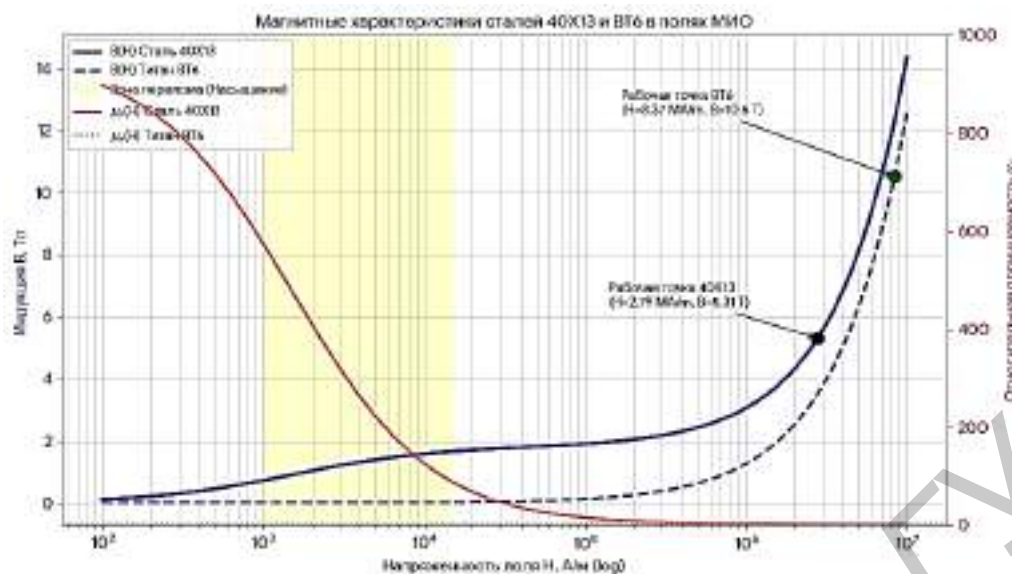


Рисунок 3. — Совмещенный график  $B = f(H)$  и  $\mu = f(H)$

На графике показана зона «перелома» (желтый фон), это область напряжений от  $10^3$  до  $1,5 \cdot 10^4$  А / м. Именно здесь кривая  $B = H$  стали 40X13 резко меняет наклон, а проницаемость начинает стремительно падать. В этой зоне сталь перестает эффективно усиливать магнитный поток.

Рабочая точка стали 40X13 (3,51 Тл): значение находится далеко за порогом насыщения. Это означает, что  $\mu$  стали упала до 1,0...1,2. Металл перестал быть эффективным «магнитопроводом» и стал просто проводником.

Рабочая точка сплава ВТ6 (10,52 Тл): для титана зона перелома отсутствует — индукция растет линейно, а проницаемость всегда равна единице. Это позволяет достигать экстремальных значений индукции в 10 Тл и выше.

КПД процесса: тот факт, что обе точки находятся в линейной зоне (где графики параллельны), говорит о том, что магнитное давление ( $p \sim B^2$ ) в экспериментах растет предсказуемо и стабильно. График подтверждает, что при полученных токах получилось преодолеть внутренние ограничения исследуемых материалов. Для стали это позволило получить «избыточное» давление, а для титана — выйти на уровень силового ударного обжатия.

6. Физическое обоснование. Несмотря на то, что исходное давление  $p = 4,9$  МПа значительно ниже предела текучести стали 40X13 ( $\sigma \approx 450...600$  МПа), упрочнение достигается за счет следующих факторов:

1) ударная амплитуда — при пиковом усилии в 1,18 МН локальные динамические напряжения в скин-слое соизмеримы с пределом текучести материала. Это инициирует акты микропластической деформации, которые локализованы в приповерхностных объемах металла;

2) акустическая активация — импульсный характер нагрузки (частота 5,2 кГц) и высокая скорость деформации способствуют «разблокировке» дислокаций, закрепленных на примесных центрах (атмосферах Коттрелла);

3) релаксация — при индукции выше 3 Тл в металлическом изделии возникают колоссальные вихревые токи (токи Фуко), которые обеспечивают механический удар с суммарным усилением в 1,18 МН для стали 40X13 и 1,65 МН для ВТ6, что, в свою очередь, обеспечивает перераспределение пиковых остаточных напряжений, накопленных после предыдущих этапов обработки, и формирование стабильной дислокационной структуры.

В процессе упрочнения определяющим является переход от потенциальной энергии магнитного поля к кинетической энергии удара, что позволяет воздействовать на структуру закаленной стали и титанового сплава на межатомном уровне.

Влияние величины технологического зазора в системе «индуктор—образец» на параметры давления. Для определения влияния величины технологического зазора  $a$  между индуктором и образцом на величину давления  $p$  построили зависимость, представленную на рисунке 4.

График показывает, что система стабильна, а выбранный зазор обеспечивает необходимый баланс между мощностью импульса и электрической прочностью зазора.

Анализ графика показывает, что при увеличении зазора уменьшение величины  $p$  плавно замедляется, приближаясь к нулю. Таким образом, наиболее предпочтительной для осуществления МИО является величина зазора, равная 0,5...1,0 мм. Зазор менее 1 мм применять нежелательно из-за опасности пробоя изолирующей прокладки сильным электромагнитным полем. В этом случае достигается максимально возможная для данных условий МИО величина давления на заготовку, соответственно, максимальная эффективность магнитно-импульсной упрочняющей обработки.

Оценка глубины проникновения электромагнитного поля. При прохождении переменного тока через проводник плотность распределения зарядов максимальна на его поверхности и экспоненциально снижается к центру. При МИО по закону Фарадея вследствие взаимной индукции участков образцов индукционный ток вытесняется ко внешнему периметру сечения образца [9]. Толщина этого активного слоя (скин-слоя  $\delta$ ) определяется моментом, когда плотность тока падает до  $1/e \approx 0,368$  от поверхностного значения. В данной зоне локализуется около 86,5 % выделяемой тепловой энергии.

Расчет глубины проникновения поля для исследуемых материалов проводится по формуле [7; 8]

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_0}} = \sqrt{\frac{0,6 \cdot 10^{-6}}{3,14 \cdot 5200 \cdot 1 \cdot 1,257 \cdot 10^{-6}}} \approx 5,18 \text{ мм} ,$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление материала 40X13, Ом · м;  $\rho \approx 0,55 \cdot 10^{-6}$ ;

$f$  — частота сигнала тока, Гц.

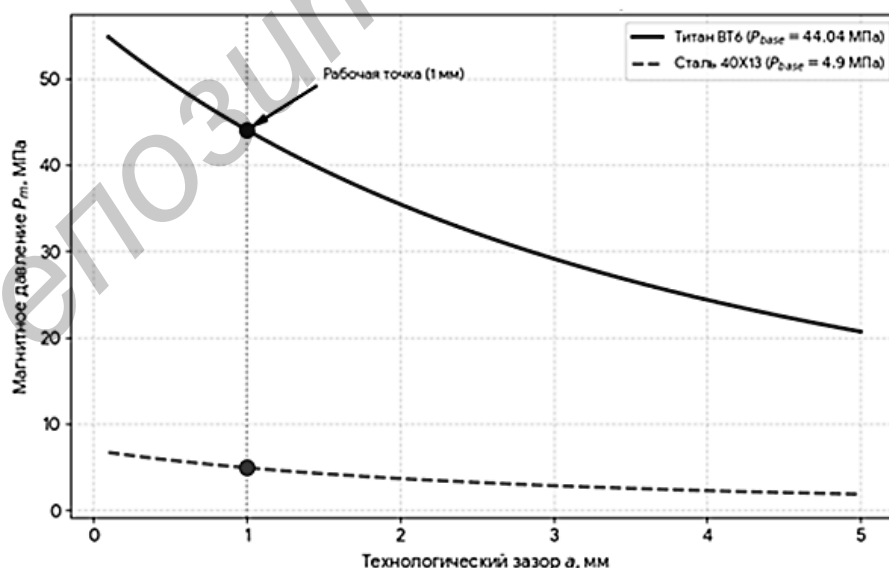


Рисунок 4. — Зависимость давления в системе «индуктор—образец» от величины технологического зазора между индуктором и образцом

**Заключение.** Предложена методика расчета суммарного статического усилия при МИО коррозионно-стойкой стали и титанового сплава, что позволит оптимизировать режимы упрочняющей обработки исследуемых материалов. Определено объемное воздействие: глубина проникновения свыше 5 мм полностью перекрывает зону дефектных напряжений после механической обработки (шлифовки/фрезеровки), которые обычно залегают на 0,5...1,0 мм. Это формирует мощный упрочненный слой с плавным градиентом свойств от поверхности к сердцевине, что обеспечивает структурную целостность: значительная толщина скин-слоя минимизирует риск возникновения эффекта «скорлупы» (отслоения упрочненной зоны) за счет исключения резких скачков напряжений.

Инерционный подпор обеспечивается распределением магнитного давления (5 МПа) на глубину более 5 мм, что создает эффект массивного воздействия, трансформируя импульс в мощный ударный вектор (эквивалентом 120 т).

Установлено, что при МИО сплава ВТ6 при частоте 6,8 кГц с удельным электрическим сопротивлением, равным  $1,7 \cdot 10^{-6}$  Ом · м, глубина скин-слоя составит 7,9 мм. Таким образом, получаем, что магнитное поле не просто давит на поверхность, оно насквозь пронизывает весь объем прутка, поскольку радиус заготовки 5 мм существенно меньше глубины проникновения 7,9 мм. Это создает объемные силы Лоренца, которые «встряхивают» кристаллическую решетку титана по всему сечению одновременно.

#### Список цитируемых источников

1. Матяс, А. Н. Определение эффективности использования упрочняющей магнитно-импульсной обработки для повышения периода стойкости режущего инструмента / А. Н. Матяс, А. М. Милокова // Механическое оборудование металлургических заводов. — Магнитогорск, 2020. — С. 3—10.
2. Исследование влияния импульсных магнитных полей на свойства поверхности образцов титанового сплава ВТ6 с покрытием ZrN, ZrNbN / А. Н. Матяс, А. Ю. Изобелло [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 2 кн. / редкол.: В. Г. Залесский (гл. ред.) [и др.]. — Мн. : ФТИ НАН Беларуси, 2024. — Кн. 2 : Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки. Обработка металлов давлением. — С. 127—138.
3. Матяс, А. Н. Разработка экспериментального оборудования для нового метода магнитно-импульсной обработки с независимым регулированием длительности импульса / А. Н. Матяс, А. А. Лях // Вестник БарГУ. Серия «Технические науки». — 2023. — Вып. 2 (14). — С. 16—27.
4. Глушечков, В. А. Технологии магнитно-импульсной обработки материалов / В. А. Глушечков, Д. Г. Черников. — Самара : Изд-во Самар. науч. центра РАН, 2014.
5. Исследование физико-механических свойств титанового сплава после магнитно-импульсной обработки / А. В. Алифанов, А. М. Милокова, А. Н. Матяс [и др.] // Вестник БарГУ. Серия «Технические науки». — 2021. — Вып. 1 (9). — С. 18—26.
6. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка материалов / А. В. Алифанов, А. М. Милокова, А. Н. Матяс [др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 2 кн. / редкол.: В. Г. Залесский (гл. ред.) [и др.]. — Мн. : ФТИ НАН Беларуси, 2021. — Кн. 1 : Новые технологии и материалы. — С. 127—153.
7. Батыгин, Ю. В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий : в 3 т. / Ю. В. Батыгин, В. И. Лавинский, Л. Т. Хищенко. — Харьков : МОСТ-Торнадо, 2003. — Т. 1. — 284 с.
8. Глушечков, В. А. Технологии магнитно-импульсной обработки материалов / В. А. Глушечков, Д. Г. Черников. — Самара : Изд-во Самар. науч. центра РАН, 2014. — 208 с.
9. Преображенский, А. А. Магнитные материалы и элементы : учеб. для вузов / А. А. Преображенский, И. Ш. Бишард. — 3-е изд., перераб. и доп. — М. : Высш. шк., 1986. — 352 с.
10. Касьяненко, М. Г. Аппроксимация кривых намагничивания электротехнических сталей при проектировании электрических машин / М. Г. Касьяненко, В. Ф. Матюхов, М. А. Ваганов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». — 2018. — № 9. — С. 69—75.
11. Батыгин, Ю. В. Теория и техника магнитно-импульсных технологий / Ю. В. Батыгин, С. Н. Гнатов, Е. А. Чаплыгин. — Харьков : ХНАДУ, 2011. — 240 с.

Поступила в редакцию 08.04.2026.

УДК 691.175.2<sup>6</sup>

**Е. В. Овчинников<sup>1</sup>**, доктор технических наук, доцент,  
**А. И. Веремейчик<sup>2</sup>**, кандидат физико-математических наук, доцент,  
**Д. А. Линник<sup>3</sup>**, кандидат технических наук, доцент,  
**А. Н. Парфиевич<sup>4</sup>**, кандидат технических наук, доцент,  
**М. В. Нерода<sup>5</sup>**, кандидат технических наук, доцент,  
**А. В. Проволенок<sup>6</sup>, Е. В. Кузнецов<sup>7</sup>, С. О. Лях<sup>8</sup>**

- <sup>1,3</sup> Учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», ул. Курчатова, 1а, 230015 Гродно, Республика Беларусь, ovchin@grsu.by  
<sup>2,4</sup> Учреждение образования «Брестский государственный технический университет», ул. Московская, 267, 224017 Брест, Республика Беларусь  
<sup>5</sup> Учреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь  
<sup>6,7</sup> Открытое акционерное общество «Минский механический завод имени С.И. Вавилова — управляющая компания холдинга «БелОМО», ул. Макаенка, 23, 220114 Минск, Республика Беларусь  
<sup>8</sup> Технологический колледж учреждения образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», ул. Горького, 84, 230015 Гродно, Республика Беларусь

## ВЛИЯНИЕ МАЛОСЛОЙНОГО ГРАФЕНА НА ПОВЕРХНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОЛИЭФИРНЫХ ПОКРЫТИЙ

В работе представлены результаты исследования влияния модификации полиэфирных покрытий малослойным графеном на их поверхностные энергетические характеристики. Целью работы является анализ изменения смачиваемости и поверхностной энергии композиционных покрытий, сформированных методом электростатического осаждения на металлических подложках различной природы. Выявлены немонотонные зависимости свойств от концентрации наполнителя, обусловленные типом подложки. Полученные данные могут быть использованы для оптимизации состава защитных покрытий в целях повышения коррозионной стойкости и снижения адгезии к полярным средам.

**Ключевые слова:** малослойный графен; композиционные полиэфирные покрытия; исследование влияния модификации полиэфирных покрытий; немонотонные зависимости.

Рис. 12. Библиогр.: 10 назв.

**E. V. Ovchinnikov<sup>1</sup>**, DSc in Technical Sciences, Associate Professor,  
**A. I. Veremeychik<sup>2</sup>**, PhD in Physics and Mathematics Sciences, Associate Professor,  
**D. A. Linnik<sup>3</sup>**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,  
**A. N. Parfievich<sup>4</sup>**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,  
**M. V. Niaroda<sup>5</sup>**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,  
**A. V. Provolenok<sup>6</sup>, E. V. Kuznetsov<sup>7</sup>, S. O. Lyakh<sup>8</sup>**

- <sup>1,3</sup> Institution of Education “Yanka Kupala State University”, 1a Kurchatov Str., 230015 Grodno, the Republic of Belarus  
<sup>2,4</sup> Institution of Education “Brest State Technical University”, 267 Moskovskaya Str., 224017 Brest, the Republic of Belarus  
<sup>5</sup> Institution of Education “Baranavichy State University”, 21 Voykova Str., 225404 Baranavichy, the Republic of Belarus  
<sup>6,7</sup> Open Joint Stock Company “Minsk Mechanical Works named after S.I. Vavilov — managing company of BelOMO holding”, 23, Makayenka Str., 220114 Minsk, the Republic of Belarus  
<sup>8</sup> The Technological College of the educational institution “Yanka Kupala State University of Grodno”, 84 Gorky Str., 230015 Grodno, the Republic of Belarus

## EFFECT OF LOW-LAYER GRAPHENE ON THE SURFACE CHARACTERISTICS OF COMPOSITE POLYESTER COATINGS

The paper presents the results of a study of the effect of polyester coatings modification with low-layer graphene on their surface energy characteristics. The aim of the work is to analyze the changes in wettability and surface energy of composite coatings formed by electrostatic deposition on various types metal substrates. The non-monotonic

dependence of the properties on the filler concentration, which is determined by the substrate type, has been revealed. The obtained data can be used to optimize the protective coatings composition in order to increase their corrosion resistance and reduce their adhesion to polar environments.

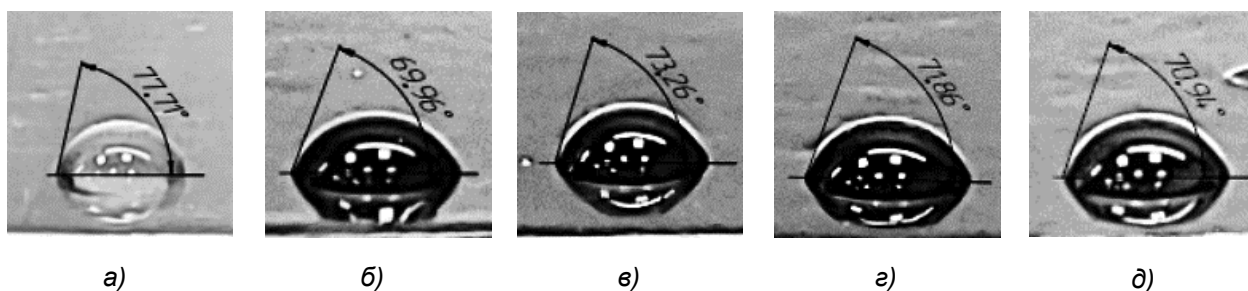
**Key words:** low-layer graphene; composite polyester coatings; study of the influence of polyester coatings modification; non-monotonic dependencies.

Fig. 12. Ref.: 10 titles.

**Введение.** Эксплуатационные характеристики изделий, такие как коррозионная стойкость, магнитная и диэлектрическая проницаемость, износостойкость и отражательная способность, теплоспротивление, изотропность и анизотропность, определяются свойствами поверхности. Надежность и долговечность деталей и функциональных узлов машин, механизмов, конструкций определяются конструктивной прочностью материалов, из которых они выполнены. Для получения высоких характеристик конструктивной прочности поверхностных слоев часто применяют различные методы нанесения покрытий, позволяющие защитить материал основы от внешних воздействий, повысить срок службы деталей и сократить расходы на ремонт изношенного оборудования [1—3]. Дополнительные эксплуатационные характеристики изделий можно улучшить, создавая искусственные поверхностные слои, которые могут отличаться от материала основы химическим и фазовым составами, структурой и свойствами. Их называют покрытиями. Покрытия наносятся для защиты поверхности от различных видов воздействий, в декоративных целях и для восстановления нарушенной геометрии изделий. В настоящее время существует следующая классификация покрытий по технологии нанесения, виду энергетического формирования, составу, природе происхождения: механические, химические, физические, физико-химические, органические, неорганические, металлополимерные, тонкие, толстые и т. п. [2; 3]. Одним из наиболее распространенных методов формирования покрытий как в строительной индустрии, так и в машиностроении является электростатическое осаждение порошковых материалов. Поверхностные свойства полимерных композитов играют ключевую роль в формировании их эксплуатационных характеристик, поэтому основной задачей данного раздела стал анализ взаимодействия жидкостей с модифицированной поверхностью образцов [4—6].

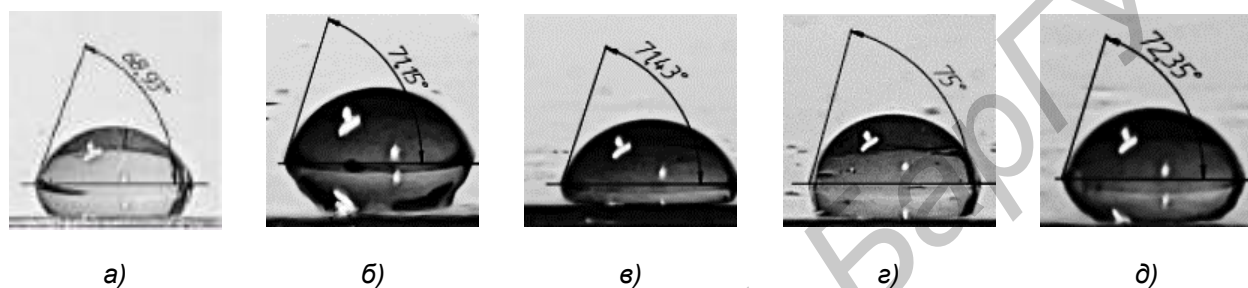
**Методология и методы исследования.** В качестве базового материала для модифицирования использовали полиэфирную смолу марки ZVEZDALIT P RAL 9005 производства Helios Srbija a.d. Для модифицирования полиэфирной матрицы использовали малослойный графен (далее — МС) производства ФТИ им. А. Ф. Иоффе, получаемый по технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза [7; 8]. Концентрация данного модификатора в композиции составляла от 0,1 до 1,5 масс. %. Введение наноразмерных частиц в полимерный порошок осуществляли на быстроходном смесителе, время перемешивания составляло 1...2 мин. Нанесение покрытий осуществляли на стандартной установке для электростатического нанесения полимерных порошковых материалов. Температура полимеризации композиции составляла 180 °С, время термообработки — 15 мин. В качестве подложки, на которой формировали покрытия, использовали низкоуглеродистую аустенитного класса сталь типа 12X18H10T, сталь 08кп, алюминиевый сплав АМг1.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Поверхностная энергия твёрдых тел является ключевым параметром, определяющим адгезионные, смачивающие и защитные свойства покрытий. В данной работе использован метод измерения краевых углов смачивания двумя жидкостями с известными компонентами поверхностного натяжения: глицерином (преимущественно дисперсионное взаимодействие) и водой (выраженный полярный вклад). Расчёт выполнялся по методу Оуэнса—Вендта, позволяющему разделить полную поверхностную энергию на дисперсионную и полярную составляющие. На каждую подложку наносилось покрытие на основе МС (гидрофобизирующий компонент), способного изменять активность поверхностных слоев композиционных покрытий [7—10]. Концентрация графеноподобных структур (далее — ГПС) варьировалась от 0,1 до 3 мас. %. Краевые углы смачивания глицерина и воды для различных поверхностей представлены на рисунках 1—6.



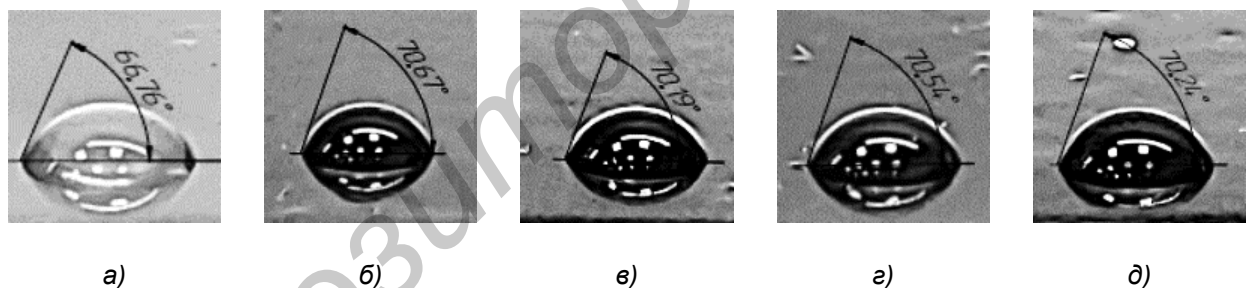
а — без покрытия; б — концентрация ГПС — 0,1 мас. %; в — концентрация ГПС — 0,5 мас. %; г — концентрация ГПС — 1 мас. %; д — концентрация ГПС — 3 мас. %

**Рисунок 1. — Угол смачивания глицерина для покрытия, нанесенного на металлическую пластину 12X18H10T**



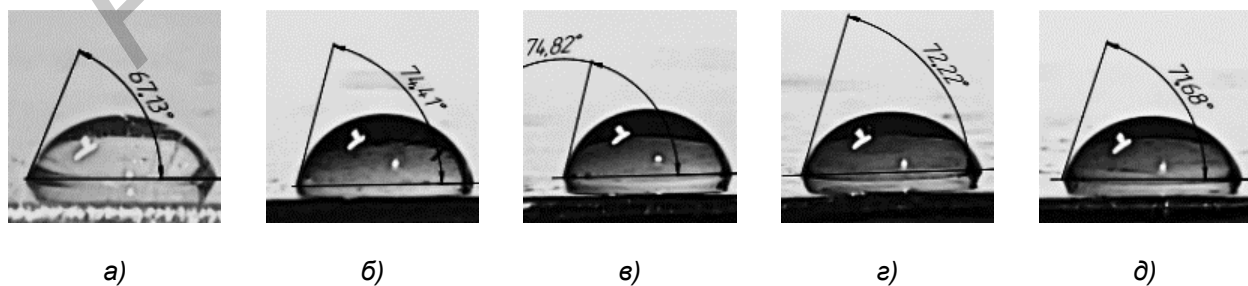
а — без покрытия; б — концентрация ГПС — 0,1 мас. %; в — концентрация ГПС — 0,5 мас. %; г — концентрация ГПС — 1 мас. %; д — концентрация ГПС — 3 мас. %

**Рисунок 2. — Угол смачивания водой для покрытия, нанесенного на металлическую пластину 12X18H10T**



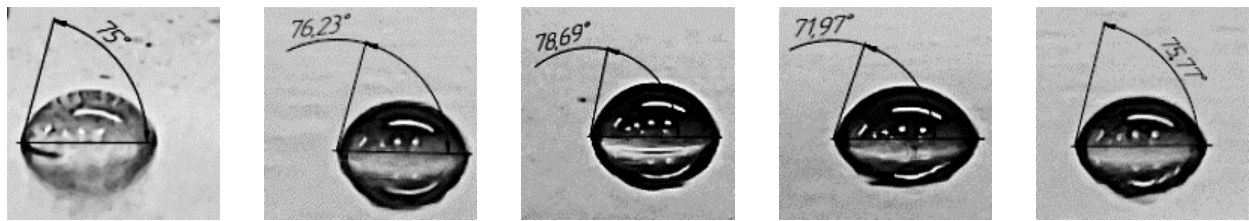
а — без покрытия; б — концентрация ГПС — 0,1 мас. %; в — концентрация ГПС — 0,5 мас. %; г — концентрация ГПС — 1 мас. %; д — концентрация ГПС — 3 мас. %

**Рисунок 3. — Угол смачивания глицерина для покрытия, нанесенного на металлическую пластину AMg1**



а — без покрытия; б — концентрация ГПС — 0,1 мас. %; в — концентрация ГПС — 0,5 мас. %; г — концентрация ГПС — 1 мас. %; д — концентрация ГПС — 3 мас. %

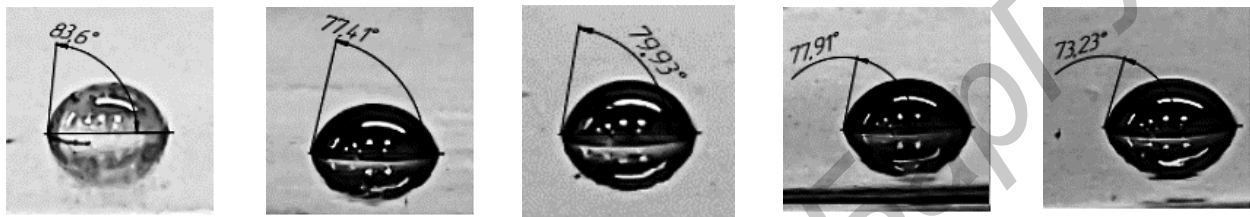
**Рисунок 4. — Угол смачивания водой для покрытия, нанесенного на металлическую пластину AMg1**



а) б) в) г) д)

а — без покрытия; б — концентрация ГПС — 0,1 мас. %; в — концентрация ГПС — 0,5 мас. %; г — концентрация ГПС — 1 мас. %; д — концентрация ГПС — 3 мас. %

**Рисунок 5. — Угол смачивания водой для покрытия, нанесенного на металлическую пластину 08кп**

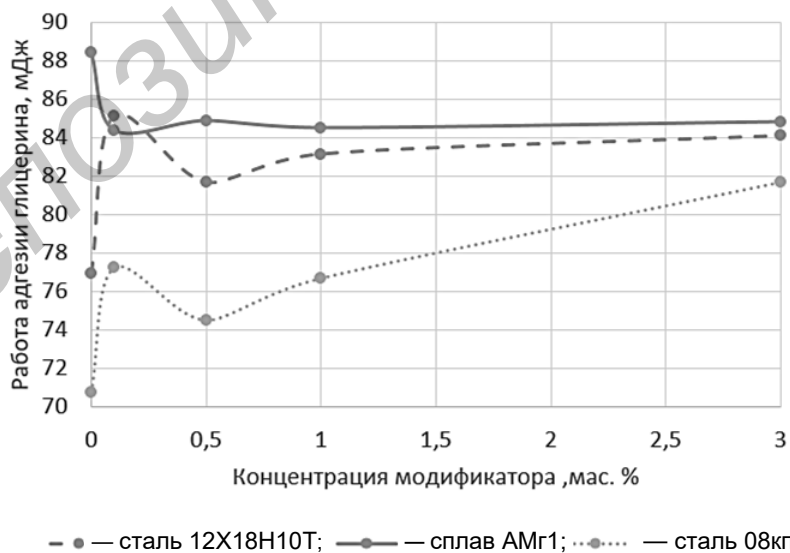


а) б) в) г) д)

а — без покрытия; б — концентрация ГПС — 0,1 мас. %; в — концентрация ГПС — 0,5 мас. %; г — концентрация ГПС — 1 мас. %; д — концентрация ГПС — 3 мас. %

**Рисунок 6. — Угол смачивания глицерина для покрытия, нанесенного на металлическую пластину 08кп**

Результаты исследований работы адгезии глицерина и воды к композиционному покрытию, удельной поверхностной энергии (далее — УПЭ) покрытия, сформированного на разных материалах, от концентрации модификатора приведены на рисунках 7—11.



**Рисунок 7. — Зависимость работы адгезии глицерина к композиционному покрытию на основе полиэфирной смолы, сформированному на разных материалах, от концентрации модификатора**

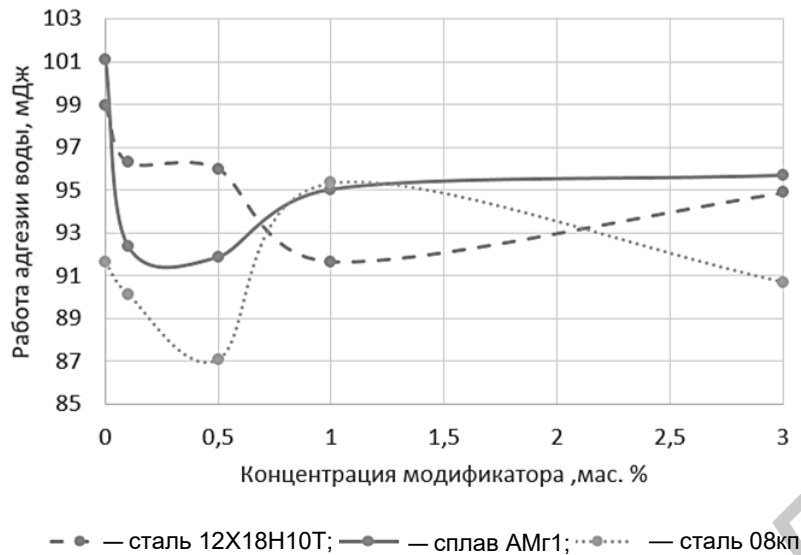


Рисунок 8. — Зависимость работы адгезии воды к композиционному покрытию на основе полиэфирной смолы, сформированному на разных материалах, от концентрации модификатора

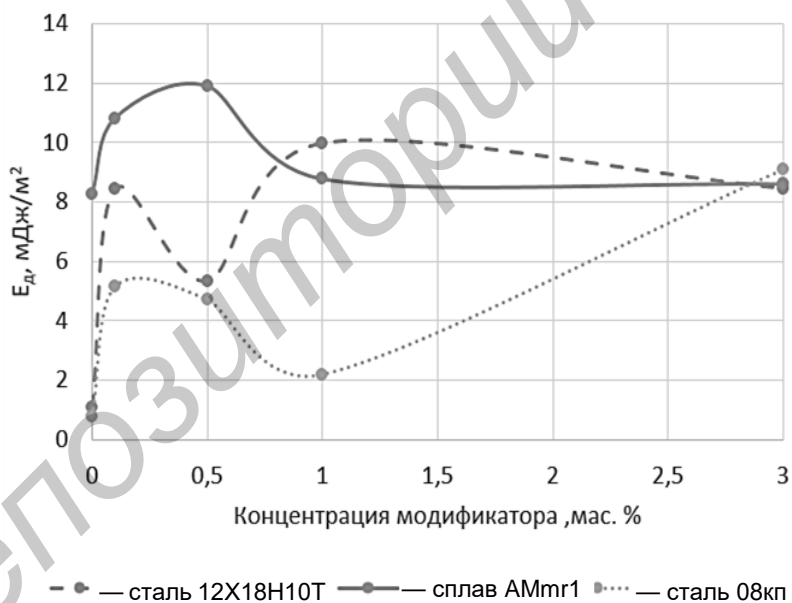
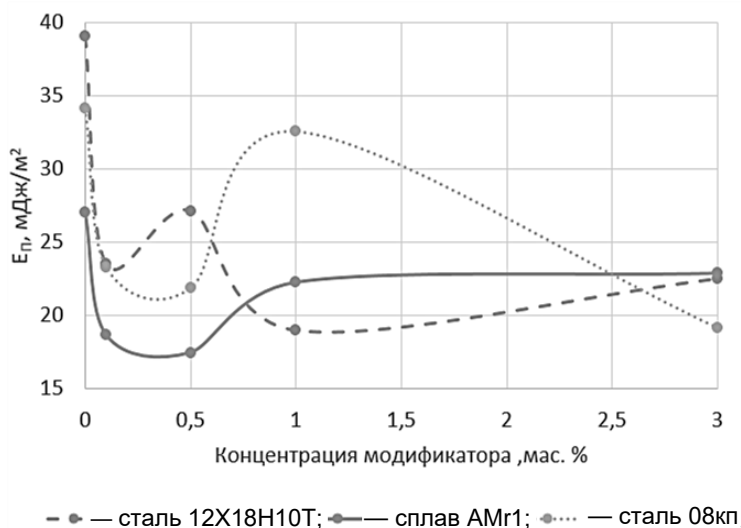
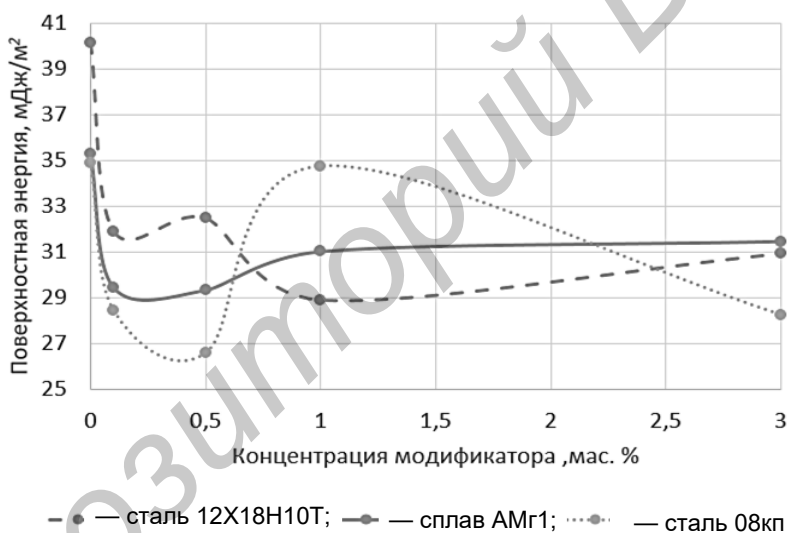


Рисунок 9. — Зависимость дисперсной составляющей УПЭ композиционного покрытия на основе полиэфирной смолы, сформированного на разных материалах, от концентрации модификатора



**Рисунок 10.** — Зависимость полярной составляющей УПЭ композиционного покрытия на основе полиэфирной смолы, сформированного на разных материалах, от концентрации модификатора

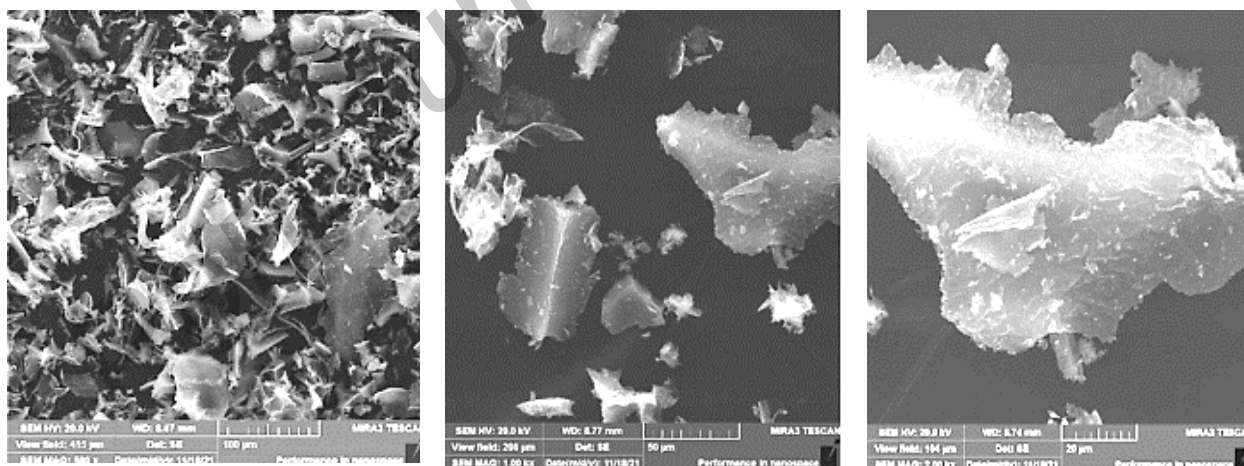


**Рисунок 11.** — Зависимость УПЭ композиционного покрытия на основе полиэфирной смолы, сформированного на разных материалах, от концентрации модификатора

Исходная поверхность стали 12Х18Н10Т без покрытия характеризуется умеренно гидрофильными свойствами, так как значения угла смачивания водой составляют 68°54', глицерином — 77°42'. Введение МС приводит к заметному изменению смачивания: угол смачивания глицерином снижается с 77°42' до 69°56'...73°18' для всех концентраций, что указывает на улучшение смачивания неполярной жидкостью. Значения угла смачивания водой увеличиваются до 71°06'...75°, т. е. смачивание полярной жидкостью ухудшается. Значения работы адгезии к глицерину увеличиваются с 76,9 до 81,7...85,1 мДж, тогда как значения работы адгезии к воде снижаются с 99,0 до 91,6...96,3 мДж. Это свидетельствует о том, что покрытие делает поверхность менее полярной, усиливая её взаимодействие с неполярными средами, ослабляя — с полярными. Удельная поверхностная энергия стали 12Х18Н10Т достаточно высокая и составляет 40,15 мДж / м<sup>2</sup>, причём основной вклад вносит

полярная составляющая ( $39,07 \text{ мДж / м}^2$ ), а дисперсионная составляющая мала ( $1,08 \text{ мДж / м}^2$ ). Это типично для окисленной металлической поверхности с высоким содержанием полярных групп. Формирование полиэфирного покрытия с МС приводит к снижению значений полной УПЭ до  $28,9...32,5 \text{ мДж / м}^2$ , резкому возрастанию дисперсионного компонента (до  $5,3...10,0 \text{ мДж / м}^2$ ) и существенному уменьшению полярного компонента УПЭ (до  $18,9...27,1 \text{ мДж / м}^2$ ). Минимальное значение ( $28,9 \text{ мДж / м}^2$ ) достигается при 1 мас. % МС. При дальнейшем увеличении концентрации до 3 мас. % поверхностная энергия незначительно возрастает ( $30,93 \text{ мДж / м}^2$ ), что может быть связано с перестройкой структуры покрытия или неполным его формированием. Таким образом, на стали 12Х18Н10Т полиэфирное покрытие, содержащие МС, эффективно снижает полярность поверхности, повышает дисперсионную составляющую и в целом уменьшает поверхностную энергию, что способствует улучшению гидрофобных свойств. Необходимо отметить, что изменение свойств покрытий, модифицированных МС, определяется также морфологией частиц, которые имеют высокие значения УПЭ (рисунок 12).

Исходный алюминиевый сплав имеет более низкие значения поверхностной энергии, чем коррозионностойкая сталь 12Х18Н10Т. Значения краевого угла смачивания водой составляют  $67^{\circ}06'$ , глицерином —  $66^{\circ}48'$ . После введения в состав покрытия МС изменений улучшается смачивание глицерином, значения краевого угла смачивания увеличиваются с  $66^{\circ}48'$  до  $70^{\circ}12'...70^{\circ}42'$ , т. е. смачивание неполярной жидкостью ухудшается с увеличением концентрации модификатора в покрытии, что противоположно зависимости, наблюдаемой при формировании покрытия на стали 12Х18Н10Т. Значения краевого угла смачивания водой модифицированных полиэфирных покрытий также возрастают с  $67^{\circ}06'$  до  $71^{\circ}42'...74^{\circ}48'$ , причём максимальное увеличение фиксируется при концентрации 0,5 мас. % ( $74,8^{\circ}$ ) МС в полиэфирном покрытии. Работа адгезии композиционного покрытия к глицерину снижается с 88,4 до  $84,4...84,9 \text{ мДж}$ , а к воде — с 101,1 до  $91,9...95,7 \text{ мДж}$ . Снижение работы адгезии к обеим жидкостям указывает на общее уменьшение энергетического взаимодействия поверхности покрытия с исследуемыми жидкостями. Для сплава АМг1 без покрытия характерны следующие значения: УПЭ —  $35,28 \text{ мДж / м}^2$ , дисперсионной компоненты поверхностной энергии —  $8,27 \text{ мДж / м}^2$ , полярной компоненты —  $27,01 \text{ мДж / м}^2$ .



**Рисунок 12.** — Морфология агломератов МС, полученных СВС-методом из крахмалас процентным содержанием исходного материала к горючему веществу (мас. %) 30 : 70 при различных разрешениях растрового электронного микроскопа

Таким образом, модифицирование полиэфирных покрытий МС, сформированных на алюминиевом сплаве, приводит к снижению значений УПЭ до 29,3...29,5 мДж / м<sup>2</sup> при концентрации модификатора 0,1 и 0,5 мас. %, увеличению значений УПЭ до 31,0...31,5 мДж / м<sup>2</sup> при концентрациях МС 1 и 3 мас. %, росту значений дисперсионного компонента до 10,8...11,9 мДж / м<sup>2</sup> при малых концентрациях и последующему снижению до уровня исходного (8,8...8,6 мДж / м<sup>2</sup>) при 1...3 мас. % МС в композиционных покрытиях. Снижение значения полярного компонента УПЭ с 27,0 до 17,4...18,6 мДж / м<sup>2</sup> происходит при концентрациях МС в покрытии 0,1...0,5 мас. % и частичному восстановлению до 22,2...22,9 мДж / м<sup>2</sup> при более высоких концентрациях. Минимальная поверхностная энергия достигается при 0,5 мас. % МС (29,34 мДж / м<sup>2</sup>). Увеличение значений УПЭ при 1 и 3 мас. % может быть связано с неоднородностью покрытия, его дефектностью или изменением ориентации молекул полиэфирной матрицы при введении МС в структуру покрытия на поверхности сплава алюминия. Тем не менее все значения удельной поверхностной энергии композиционного покрытия ниже, чем без покрытия, что подтверждает гидрофобизирующий эффект.

Низкоуглеродистая сталь без покрытия имеет самую высокую гидрофобность среди исходных исследуемых подложек (угол смачивания водой — 75,0°, глицерином — 83,4°), однако значения УПЭ 34,92 мДж / м<sup>2</sup> наиболее близки к алюминиевому сплаву. Влияние МС на свойства полиэфирных покрытий, сформированных на стали 08кп, выражены достаточно неоднозначно: значения угла смачивания глицерином снижаются с 83°24' до 73°12'...79°56', что указывает на улучшение смачивания неполярной жидкостью композиционного покрытия, особенно при концентрации модификатора 3 мас. % (значения краевого угла смачивания — 73°12'). В случае смачивания покрытия водой при концентрации модификатора 0,1...0,5 мас. % значение возрастает до 76,2...78,7°, затем при 1 мас. % резко снижается до 72,0°, а при 3 мас. % снова увеличивается до 75°48'. Работа адгезии композиционного покрытия к глицерину растёт со значений 70,7 мДж до 74,5...81,7 мДж, достигая максимума при концентрации 3 мас. % МС (81,7 мДж). Работа адгезии к воде изменяется нелинейно, снижаясь до значений 87,1...90,1 мДж при концентрации модификатора 0,1...0,5 мас. % и 3 мас. %, но возрастает до значений 95,3 мДж при концентрации МС 1 мас. %. Исходя из полученных данных, возможно предположить, что исходный образец стали 08кп характеризуется низкими значениями дисперсионной составляющей (0,77 мДж / м<sup>2</sup>) и высокими параметрами полярной составляющей УПЭ (5 мДж / м<sup>2</sup>), что характерно для поверхности, покрытой оксидными плёнками, значения УПЭ находятся в области 34,92 мДж / м<sup>2</sup>. Таким образом, введение МС в состав полиэфирного покрытия приводит к снижению значений УПЭ до 28,4...28,3 мДж / м<sup>2</sup> при концентрации модификатора 0,1 и 0,5 мас. % и до 28,3 мДж / м<sup>2</sup> при 3 мас. %, резкому возрастанию значения УПЭ до 34,76 мДж / м<sup>2</sup> при концентрации 1 мас. % малослойных ГПС, что практически соответствует исходному значению, росту дисперсионного компонента до 5,15 и 4,71 мДж / м<sup>2</sup> при малых концентрациях, затем снижению значений до 2,19 мДж / м<sup>2</sup> при концентрации модификатора 1 мас. % и затем дальнейшему увеличению значений до 9,10 мДж / м<sup>2</sup> при концентрации модификатора 3 мас. %. Полярный компонент УПЭ снижается при концентрации МС в составе покрытия при 0,1...0,5 мас. % полярного компонента с 34,15 до 23,3...21,9 мДж / м<sup>2</sup> при 0,1...0,5 %, затем увеличивается до 32,6 мДж / м<sup>2</sup> при концентрации 1 мас. % и снижается до 19,2 мДж / м<sup>2</sup> при 3 мас. %.

Такой характер изменений параметров УПЭ свидетельствует о немонотонном изменении зависимости свойств покрытия от концентрации МС, сформированных на стали 08кп. Вероятно, при 1 мас. % происходит перестройка структуры покрытия (возможно образование агрегатов или неполное смачивание подложки), что возвращает поверхностные свойства к исходным покрытиям. При 3 мас. % покрытие становится более однородным, поверхностная энергия вновь снижается до значений, характерных для гидрофобизированных поверхностей. Исходя из полученных данных, можно констатировать, что наибольший модифицирующий эффект введение МС в состав полиэфирных покрытий оказывает при формировании данного типа покрытий на стальной подложке 12Х18Н10Т. Исходная металлическая поверхность обладает самыми высокими значениями полярной составляющей УПЭ

и практически нулевой дисперсионной составляющей. При концентрации 0,1 мас. % МС в покрытии значения полярной составляющей снижаются почти вдвое, а дисперсионная составляющая возрастает на порядок. Удельная поверхностная энергия уменьшается на 20...25 % и стабилизируется в диапазоне 29...32 мДж / м<sup>2</sup>. Оптимальной концентрацией с точки зрения минимизации значений УПЭ при высоких эксплуатационных характеристиках является концентрация модификатора в области 1 мас. %. На алюминиевом сплаве АМг1 эффект от применения МС в полиэфирном покрытии менее выражен. Значения УПЭ ниже, чем у коррозионностойкой стали, снижение составляет около 15...17 %. Однако наблюдается обратная зависимость при концентрациях выше 0,5 мас. %: значения УПЭ начинают увеличиваться, что может быть обусловлено особенностями адгезионного взаимодействия композиционного полиэфирного покрытия на оксиде алюминия, склонностью к образованию островковых структур (областей с повышенным молекулярным упорядочением в структуре матрицы полиэфирного покрытия) или конкурирующим процессом, происходящим между хемосорбцией и физической адсорбцией при образовании покрытия на поверхности алюминиевого сплава. Изменение поверхностных свойств композиционного полиэфирного покрытия, полученного на стали 08кп, носит немонотонный характер. Минимумы значений УПЭ наблюдаются при 0,5 и 3 мас. %, а при 1 мас. % значения возвращаются к исходным. Это может указывать на формирование покрытия, имеющего поры и полтрузии. Увеличение концентрации модификатора до 3 мас. % позволит сформировать сплошное и гидрофобное покрытие. Во всех случаях увеличение угла смачивания водой сопровождается снижением значений полярной составляющей УПЭ. Для глицерина данная связь менее однозначна: на стали 12Х18Н10Т угол смачивания глицерином уменьшается при росте дисперсионной составляющей, что объясняется улучшением дисперсионного взаимодействия. На алюминии угол смачивания глицерином, напротив, возрастает, несмотря на некоторое увеличение значений неполярной составляющей УПЭ. Это может быть связано с изменением топографии поверхности или с тем, что на алюминии преобладает влияние полярной компоненты даже при её снижении. Полученные данные показывают, что введение МС позволяет целенаправленно изменять энергетические характеристики композиционных покрытий. Для всех трёх типов исследуемых подложек удаётся снизить поверхностную энергию на 15...30 %, причём основной вклад вносит уменьшение полярной составляющей. Это важно для создания защитных покрытий с низкой адгезией к полярным средам (например, для антикоррозионной защиты или придания водоотталкивающих свойств). Оптимальная концентрация ГПС зависит от типа металла: для нержавеющей стали — 1 мас. %, алюминиевого сплава — 0,5 мас. %, низкоуглеродистой стали — 0,5 или 3 мас. %.

**Заключение.** В ходе проведенных исследований методом краевого угла смачивания по изучению поверхностных характеристик композиционных покрытий на основе полиэфирных соединений, модифицированных МС, установлены значения поверхностной энергии металлических подложек 12Х18Н10Т, АМг1 и 08кп, а также покрытий, содержащих МС с концентрацией 0,1...3,0 мас. %. Исходные подложки характеризуются высокой полярной составляющей поверхностной энергии (27...39 мДж / м<sup>2</sup>) и низкой дисперсионной (0,8...8,3 мДж / м<sup>2</sup>). Наиболее полярной является сталь 12Х18Н10Т, наименее — алюминиевый сплав АМг1. Введение МС в полиэфирное покрытие приводит к снижению значений УПЭ для всех типов подложек. Максимальное снижение (до 28,9 мДж / м<sup>2</sup>) зафиксировано для стали 12Х18Н10Т при 1 мас. % МС. Для АМг1 минимальная энергия (29,3 мДж / м<sup>2</sup>) достигается при 0,5 мас. %, для стали 08кп — при 0,5 и 3 мас. % (26,6...28,3 мДж / м<sup>2</sup>). Изменение энергетических характеристик обусловлено главным образом уменьшением полярной составляющей и возрастанием дисперсионной, что свидетельствует о гидрофобизации поверхности. Обнаружены немонотонные изменения зависимостей значений УПЭ композиционных полиэфирных покрытий от концентрации модификатора, сформированных на подложках АМг1 и 08кп,

указывающие на возможные структурные перестройки покрытия при увеличении концентрации ГПС выше 0,5...1,0 мас. %. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации состава защитных покрытий, предназначенных для снижения адгезии к полярным жидкостям и повышения коррозионной стойкости металлов.

#### Список цитируемых источников

1. Физико-механические характеристики нанокomпозиционных покрытий, формируемых методом электроискрового легирования / В. В. Михайлов [и др.] // *Вестник Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Серыя 6 : Тэхніка.* — 2019. — Т. 9, № 2. — С. 45—53.
2. Физико-механические характеристики жаростойких покрытий на основе Al-Ti-N / Н. М. Чекан [и др.] // *Вестник Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Серыя 6 : Тэхніка.* — 2014. — № 1 (169). — С. 95—102.
3. Овчинников, Е. В. Формирования тонкопленочных покрытий при воздействии технологических факторов / Е. В. Овчинников // *Прогрессивные технологии и системы машиностроения : Междунар. сб. науч. тр. / ДонНТУ.* — Донецк : ДонНТУ, 2013. — С. 197—205.
4. Овчинников, Е. В. Полиэфирные нанокomпозиционные покрытия / Е. В. Овчинников, С. О. Лях, Е. В. Серко // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилёв, 24—25 апр. 2025 г.* — Могилев : Бел.-Рос. ун-т, 2025. — С. 145—146.
5. Износостойкие полиэфирные покрытия для строительных конструкций / Е. В. Овчинников [и др.] // *Наука и инновации в строительстве : сб. докл. IX Междунар. науч.-практ. конф., Белгород, 15 апр. 2025 г.* — Белгород : БГТУ, 2025. — С. 277—282.
6. Реактопластичные графенсодержащие композиционные материалы / Е. В. Овчинников [и др.] // *Горная механика и машиностроение.* — 2025. — № 3. — С. 66—74.
7. Лях, С. О. Антифрикционные полимерные покрытия для строительных изделий / С. О. Лях, Е. В. Серко, Е. А. Тарасюк ; науч. рук. Е. В. Овчинников // *Инженерное и экономическое обеспечение деятельности транспорта и машиностроения : сб. материалов IX Междунар. науч. конф. молодых ученых, Гродно, 30 мая 2025 г. / Гродн. гос. ун-т им. Янки Купалы ; отв. ред. Д. А. Линник ; редкол.: Д. А. Линник [и др.].* — Гродно : ГрГУ им. Янки Купалы, 2025. — С. 785—791.
8. Триботехнические характеристики фотополимерных материалов, модифицированных графеновыми наночастицам / Е. И. Эйсымонт [и др.] // *Горная механика и машиностроение.* — 2025. — № 1. — С. 78—89.
9. Графеновые наноматериалы: структура, свойства, применение / Е. В. Овчинников [и др.] // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилёв, 24—25 апр. 2025 г.* — Могилев : Бел.-Рос. ун-т, 2025. — С. 19—24.
10. Графенсодержащие композиционные смазочные материалы / А. П. Возняковский [и др.] // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 2 кн.* — Мн. : ФТИ НАН Беларуси, 2024. — Кн. 1 : Материаловедение. — С. 145—152.

Поступила в редакцию 06.04.2026.

Л. Л. Сотник<sup>1</sup>, кандидат технических наук, доцент,  
И. А. Богданович<sup>2</sup>, кандидат технических наук, доцент,  
А. В. Малевич<sup>3</sup>, В. В. Малеронок<sup>4</sup>, кандидат технических наук, доцент  
<sup>1, 2, 3</sup>Учреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Войкова, 21,  
225404 Барановичи, Республика Беларусь, <sup>1</sup>sotnikleonidtm@gmail.com  
<sup>4</sup>Учреждение образования «Белорусская государственная академия авиации», ул. Уборевича, 77,  
220096 Минск, Республика Беларусь

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРАБОТКИ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТАЛЕЙ МАШИН И РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ КОМБИНИРОВАННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

Статья посвящена актуальной проблеме обеспечения надежности и долговечности металлических изделий и инструмента, эксплуатируемых в условиях интенсивного триботехнического нагружения и циклических температурных воздействий. Проведен системный анализ фундаментальных механизмов упрочнения поверхностных слоев, включая субструктурное, твердорастворное, поликристаллическое и дисперсионное упрочнение. Рассмотрены и классифицированы современные технологии модификации свойств материалов: химико-термическая обработка (азотирование, борирование), высокоэнергетические методы (лазерное, плазменное, электронно-лучевое воздействие), магнитно-импульсная обработка, а также нанесение наноструктурированных покрытий (PVD, CVD). Особое внимание уделено перспективам развития гибридных и комбинированных технологий (Duplex Treatment), позволяющих достичь синергетического эффекта и существенно повысить износостойкость. Обоснована необходимость перехода от традиционных методов к интеллектуальным. Сделан вывод о том, что рациональный подбор методов упрочнения требует учета взаимосвязи параметров энергетического воздействия и условий эксплуатации для максимизации ресурса машиностроительной продукции.

**Ключевые слова:** упрочнение поверхностей; износостойкость; машиностроение; химико-термическая обработка; высокоэнергетические методы; наноструктурированные покрытия; микроструктура; гибридные технологии.

Библиогр.: 63 назв.

L. L. Sotnik<sup>1</sup>, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,  
I. A. Bogdanovich<sup>2</sup>, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,  
A. V. Malevich<sup>3</sup>, V. V. Maleronok<sup>4</sup>, PhD in Technical Sciences, Associate Professor  
<sup>1, 2, 3</sup>Institution of Education "Baranavichy State University", 21 Voykova Str., 225404 Baranavichy,  
the Republic of Belarus, <sup>1</sup>sotnikleonidtm@gmail.com  
<sup>4</sup>Institution of Education "Belarusian State Aviation Academy", 77 Ubovichy Str., 220096 Minsk,  
the Republic of Belarus

## PROSPECTS FOR DEVELOPING METHODS TO IMPROVE THE OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF MACHINE PARTS AND CUTTING TOOLS THROUGH COMBINED INFLUENCE

The article is devoted to the actual problem of ensuring the reliability and durability of metal products and tools operated under conditions of intensive tribotechnical loading and cyclic temperature effects. A systematic analysis of the fundamental mechanisms of surface layer hardening, including substructural, solid-solution, polycrystalline, and dispersion hardening, has been carried out. Modern technologies for modifying the properties of materials are considered and classified: chemical-thermal treatment (nitriding, boriding), high-energy methods (laser, plasma, and electron-beam treatment), magnetic-pulse treatment, and the application of nanostructured coatings (PVD, CVD). Special attention is paid to the prospects for the development of hybrid and combined technologies (Duplex Treatment), which allow for a synergistic effect and significantly increase wear resistance. The necessity of transitioning from traditional methods to intelligent methods is substantiated. The conclusion is that the rational selection of hardening methods requires taking into account the relationship between the energy impact parameters and operating conditions in order to maximize the resource of engineering products.

**Key words:** surface hardening; wear resistance; mechanical engineering; chemical-thermal treatment; high-energy methods; nanostructured coatings; microstructure; hybrid technologies.

Ref.: 63 titles.

**Введение.** Обеспечение надежности и долговечности деталей машин и инструмента, работающих в условиях интенсивного триботехнического нагружения, циклических температурных воздействий и прерывистого контакта, является фундаментальной задачей современного машиностроения [1—5]. Одним из наиболее эффективных векторов совершенствования функциональных характеристик таких объектов выступает направленная модификация их структуры с применением высокоэнергетических упрочняющих технологий [6; 7]. Современные методы воздействия на рабочие поверхности, несмотря на существенные различия в используемых физических принципах (лазерное излучение, плазменные потоки, ультразвуковая кавитация, ионная имплантация) и средах обработки (вакуум, инертные или химически активные газы), направлены на формирование градиентных структур с повышенным комплексом физико-механических свойств [1; 8].

С позиций фундаментального металловедения упрочнение поверхностного слоя деталей машин и инструмента обеспечивается четырьмя базовыми механизмами либо их синергетической комбинацией [9]:

1) *субструктурное упрочнение*, достигаемое за счет генерации в кристаллической решетке металла высокой плотности линейных дефектов — дислокаций (при плотностях, достигающих  $10^{-6} \dots 10^{-7} \text{ м}^{-2}$  [9; 10]. Преднамеренное искажение кристаллической решетки создает энергетические барьеры для движения дислокаций, что повышает сопротивляемость материала пластической деформации и износу;

2) *твердорастворное упрочнение*, основанное на модификации параметров кристаллической решетки матрицы при внедрении или замещении атомами легирующих элементов, что приводит к возникновению локальных полей напряжений и росту микротвердости [11];

3) *поликристаллическое (зернограничное) упрочнение*, реализуемое путем измельчения зеренной структуры металла до субмикронного и нанокристаллического уровней, что увеличивает долю межзеренных границ и препятствует распространению усталостных трещин [12; 13];

4) *многофазное (дисперсионное) упрочнение*, связанное с формированием в структуре инструментальных и конструкционных материалов гетерофазных композиций и выделением мелкодисперсных упрочняющих фаз (нитридов, карбидов, интерметаллидов), блокирующих линии скольжения [14; 15].

Эффективность эксплуатации металлического инструмента и деталей машин определяется их способностью сохранять заданную геометрию (стойкостью) и обеспечивать требуемое качество обрабатываемой поверхности или функционального контакта. Все известные механизмы упрочнения базируются на структурно-фазовых и дислокационных превращениях в твердом теле. Целенаправленные изменения в приповерхностном слое трансформируют прочностные свойства изделия в целом, позволяя достичь существенного прироста износостойкости как при использовании традиционных термических методов, так и при применении инновационных плазменных и лазерных технологических процессов [7; 16; 17].

В процессе энергетической модификации металлов (тепловой, световой энергией или потоками заряженных частиц) часть поглощенной энергии преобразуется во внутреннюю энергию системы, воздействуя на зерна, дислокации и дефекты кристаллической структуры. Итоговое состояние упрочненных слоев характеризуется величиной и знаком остаточных напряжений, степенью дефектности фаз и характером микроструктурных изменений [6; 18].

Оптимизация таких факторов, как снижение коэффициента трения в зоне контакта, повышение теплостойкости и твердости поверхностей, а также уменьшение адгезионного взаимодействия с контртелом, определяет итоговую результативность метода упрочнения [19—21]. Технологии, основанные на синтезе функциональных покрытий, обеспечивают дополнительную защиту основы инструмента и деталей от высокотемпературной эрозии и химической деструкции [22; 23].

Несмотря на наличие широкого спектра классификаций методов упрочнения металлических материалов [24—27], большинство из них не учитывают взаимосвязь между параметрами энергетического воздействия и достигаемыми эксплуатационными свойствами изделий. Рациональный подбор режимов упрочняющей обработки в сочетании с условиями эксплуатации остается сложной многофакторной задачей, требующей глубокого анализа контактного взаимодействия и структурной стабильности упрочненных поверхностей [2; 25].

**Методология и методы исследования.** *Анализ и систематизация методов упрочнения материалов и инструмента в современном машиностроении.* В работах профильных материаловедческих центров подчеркивается, что ресурс деталей машин и инструмента лимитируется не только объемными свойствами материала, но и качеством поверхностного слоя. Переход к комплексной инженерии поверхности является базовым условием создания конкурентоспособной продукции и обеспечения технологического суверенитета в современном машиностроении [29—31]. В настоящей работе представлен краткий обзор существующих методов упрочнения деталей машин и инструмента. Исследование не претендует на исчерпывающий анализ всех известных технологий, а акцентирует внимание на перспективах разработки методов повышения эксплуатационных характеристик посредством комбинированных воздействий.

*1. Химико-термическое упрочнение и ионная модификация.* Химико-термическая обработка (ХТО) остается доминирующим методом создания износостойких слоев значительной глубины (до 1 мм). Фундаментальные основы ХТО получили развитие в современных ионно-вакуумных процессах [32].

Ионно-плазменное азотирование (далее — ИПА): в ходе исследований механизмов формирования нитридных зон в легированных сталях установлено, что управление параметрами плазменного разряда и плотностью ионного тока позволяет целенаправленно изменять фазовый состав диффузионного слоя [33—36]. Использование безводородных аргоно-азотных сред позволяет избежать наводороживания инструментальных сталей, что критично для предотвращения хрупкого разрушения режущих кромок [35].

Интенсификация процессов: применение методов циклического азотирования с осциллирующим потенциалом позволяет сокращать время обработки в 1,5...2,0 раза при сохранении требуемых прочностных характеристик [37].

Диффузионное борирование: результаты промышленной эксплуатации подтверждают, что борирование в порошковых средах является наиболее эффективным методом защиты штампового инструмента от интенсивного абразивного износа [38—40].

*2. Высокотермические методы обработки.* Использование концентрированных потоков энергии (лазер, электронный луч, плазма) позволяет реализовывать сверхбыструю закалку и локальное модифицирование поверхности без термических деформаций основы [41—44].

Лазерное упрочнение: лазерное воздействие приводит к образованию специфических дислокационных структур, повышающих микротвердость поверхности до 10...12 ГПа [40; 41]. Экстремальные скорости охлаждения при такой обработке позволяют получать наноструктурированные фазы мартенсита [43].

Плазменные технологии: разработаны научные основы создания композиционных защитных покрытий на базе самофлюсующихся сплавов. Метод плазменного напыления с последующим оплавлением позволяет восстанавливать геометрию и повышать ресурс дорогостоящего прессового инструмента [44—46].

*3. Магнитно-импульсное упрочнение и деформационное воздействие.* Магнитно-импульсная обработка (далее — МИО) — высокоскоростной метод, основанный на преобразовании энергии электромагнитного поля в ударные волны. Данное направление активно развивается в научно-исследовательских институтах физико-технического профиля.

Механизм воздействия: МИО инициирует глубокую перестройку субструктуры материала. Импульсное воздействие на быстрорежущие стали приводит к измельчению карбидной фазы и блоков мозаики, повышая красностойкость инструмента на 15...20 % [3; 47—49].

Упрочнение инструментальных сборок: особенностью МИО является возможность упрочнения инструмента в сборе (например, сборных фрез), так как импульсное поле создает благоприятные остаточные напряжения сжатия в зонах концентрации нагрузок [50].

4. *Наноструктурированные покрытия и комбинированные методы.* Нанесение тонкопленочных покрытий методами PVD и CVD является стандартом для режущего инструмента. Однако для работы в экстремальных условиях необходима синергия физико-химических воздействий.

Многослойные системы (PVD): разработка архитектур наноструктурированных пленок (Ti-Al-N, Ti-Zr-N) позволяет эффективно блокировать распространение микротрещин [51—55].

Комбинированные технологии (Duplex Treatment): сочетание «ионное азотирование + PVD-напыление» предотвращает эффект «продавливания» твердого покрытия при контакте с обрабатываемым материалом, увеличивая адгезионную прочность до 80...100 Н. Это обеспечивает рост стойкости штампов в 5...8 раз [56—58].

**Результаты исследования и их обсуждение.** Особый интерес представляет сочетание ИПА — метода химико-термической обработки, а также МИО — метода энергетического воздействия. Исследования показывают, что внешние энергетические поля могут усиливать диффузионные процессы и менять структуру азотированного слоя [44; 48].

Основная проблема ИПА инструментальных сталей, например Р6М5 или 4Х5МФС, — охрупчивание поверхности при формировании сплошной нитридной зоны. Но точный контроль параметров плазмы, особенно при низких температурах около (400 °С), помогает свести эти эффекты к минимуму и не допустить чрезмерного роста зерна [59].

Магнитно-импульсная обработка действует через вихревые токи и пондеромоторные силы. Это приводит к перестройке дислокаций. МИО может активировать диффузию перед азотированием и снижать напряжения после него. Интеграция ИПА с ионно-лучевым напылением углеродных слоев демонстрирует высокий потенциал в формировании многофункциональных покрытий на сталях вроде AISI H13 [60]. В Беларуси ключевой вклад в совершенствование импульсных технологий внесли ученые БНТУ и Физико-технического института НАН Беларуси. Их исследования под руководством ведущих профессоров национальной научной школы однозначно показывают: предварительная пластическая деформация либо импульсные воздействия генерируют каналы быстрой диффузии азота [3; 44].

Модификация структурно-фазового состояния сталей ионно-плазменными методами даёт оптимальный баланс твердости и вязкости [44].

Российские группы работают с ИПА в тлеющем разряде с наложением магнитных полей [33]. Показано, что магнитное поле стабилизирует разряд и увеличивает плотность ионного тока. За счёт этого время насыщения сокращается в 1,5...2,0 раза, а качество поверхностного слоя улучшается.

Зарубежные исследования делают акцент на управлении фазовым составом диффузионного слоя. Для максимальной коррозионной стойкости и твердости стремятся получить монофазный слой  $\epsilon$ -нитрида. Добиваются этого изменением содержания углерода в плазменной среде [61].

Для быстрорежущих сталей критична адгезия слоя к подложке. Эксперименты показывают прямую связь между временем импульсного воздействия плазмы и нанотвердостью поверхности. Увеличение времени обработки до 3,5 ч заметно повышает эксплуатационные характеристики инструмента [62].

*Анализ сочетаний воздействий (МИО и ИПА).*

1. Предварительная МИО перед ИПА. Такой сценарий рассматривают как способ активации поверхности. Магнитный импульс создаёт высокую плотность дефектов кристаллической решётки — вакансий, дислокаций. При последующем ИПА атомы азота диффундируют по этим дефектам гораздо быстрее. В итоге можно получить упрочнённый слой большей глубины [3; 63].

2. Последовательность ИПА + МИО. Азотированный слой очень твёрдый, но склонен к микротрещинам при динамических нагрузках. МИО после азотирования играет роль «магнитного отпуска». Импульсное поле способствует перераспределению остаточных растягивающих напряжений в сжимающие [3; 44; 63]. Это сильно повышает предел выносливости инструмента.

**Заключение.** Подбор метода упрочнения — сложная многофакторная задача. Существующие классификации не всегда систематизируют параметры воздействий и получаемые свойства, поэтому выбор для производства затруднён [9]. У каждого метода свои плюсы и минусы. Покрытия дают хороший барьер, но они дорогие и хрупкие. Лазерная обработка даёт высокую твердость, но есть риск трещин. Ультразвуковая и дробеструйная обработки создают сжимающие напряжения, но они ограничены по глубине. Оптимальные поверхностные свойства обычно получают сочетанием режимов эксплуатации и упрочняющей обработки [2].

Проведенный анализ подтверждает, что потенциал традиционных методов упрочнения близок к исчерпанию. Дальнейший рост эффективности металлообработки связан с внедрением гибридных технологий, объединяющих диффузионное насыщение, импульсное воздействие и наноструктурирование. Результаты исследований белорусских и российских ученых обеспечивают необходимый фундамент для технологического развития машиностроения.

#### Список цитируемых источников

1. *Тюрин, Ю. Н.* Плазменные упрочняющие технологии / Ю. Н. Тюрин, М. Л. Жадкевич. — Киев : Наук. думка, 2008. — 218 с.
2. *Григорьев, С. Н.* Технологические методы повышения износостойкости контактных площадок режущего инструмента / С. Н. Григорьев, В. П. Табаков, М. А. Волосова. — Старый Оскол : ТНТ, 2011. — 268 с.
3. *Белый, А. В.* Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев / А. В. Белый, Г. Д. Карпенко, Н. К. Мышкин. — М. : Машиностроение, 1991. — 208 с.
4. Теория и технология азотирования / Ю. М. Лахтин [и др.]. — М. : Metallurgy, 1991. — 320 с.
5. Химико-термическая обработка металлов и сплавов : справочник / Г. В. Борисенко [и др.]. — М. : Metallurgy, 1981. — 424 с.
6. *Жигалов, А. Н.* Теоретические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания : монография / А. Н. Жигалов, В. К. Шелег. — Могилев : МГУП, 2019. — 213 с.
7. *Лощак, М. Г.* Упрочнение твердых сплавов / М. Г. Лощак, Л. И. Александрова. — Киев : Наук. думка, 1977. — 148 с.
8. *Жигалов, А. Н.* Методы упрочнения твердосплавного инструмента, их достоинства и недостатки / А. Н. Жигалов, А. А. Жолобов, О. Н. Кляус // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 25—26 апр. 2019 г. / Бел.-Рос. ун-т ; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. — Могилев : Бел.-Рос. ун-т, 2019. — С. 39—40.*
9. *Федорченко, И. М.* Основы порошковой металлургии / И. М. Федорченко, Р. Л. Андриевский. — Киев : АИ УССР, 1963. — 420 с.
10. Dislocation Entropy: Temperature and Density Dependence / J. S. Okst [et al.] // arXiv.org. — 2026. — URL: <https://arxiv.org/abs/> (date of access: 25.03.2026).
11. The Diffusion-Hardening Effect on the Technological Properties of High-Temperature Steel / O. G. Sitalo [et al.] // arXiv.org. — 2018. — URL: <https://arxiv.org/abs/> (date of access: 25.03.2026).
12. Патент RU 2354749. Способ получения наноструктурированных функционально-градиентных износостойких покрытий : опубл. 10.05.2009 / Горынин И. В., Фармаковский Б. В., Геращенко Д. А., Васильев А. Ф.
13. *Вохидов, А. С.* Нанология сегодня и завтра / А. С. Вохидов, Л. О. Добровольский // *Станочный парк.* — 2009. — № 5 (61). — С. 38—42.
14. Nanosized precipitates in H13 tool steel low temperature plasma nitriding / R. S. S. de Oliveira [et al.] // arXiv.org. — 2012. — URL: <https://arxiv.org/abs/> (date of access: 25.03.2026).
15. A multidisciplinary approach to study precipitation kinetics and hardening in an Al-4Cu (wt. %) alloy / J. M. S. de Oliveira [et al.] // arXiv.org. — 2018. — URL: <https://arxiv.org/abs/> (date of access: 25.03.2026).
16. *Воронцов, П. А.* О целесообразности импульсно-лазерного упрочнения металлокерамических твёрдых сплавов / П. А. Воронцов, В. М. Гончаров, М. Н. Шагров // *Сб. науч. тр. СевКавГТУ. Серия «Естественнонаучная».* — 2005. — № 1. — С. 77—80.

17. *Осколкова, Т. Н.* Упрочнение поверхности карбидовольфрамового твердого сплава электровзрывной обработкой / Т. Н. Осколкова, Е. А. Будовских // Вести высших учебных заведений Черноземья. — 2011. — № 1 (23). — С. 88—92.
18. Plackett-Burman experimental design for pulsed-DC-plasma deposition of DLC coatings / G. G. Fuentes [et al.] // arXiv.org. — 2015. — URL: <https://arxiv.org/abs/> (date of access: 25.03.2026).
19. *Табаков, В. П.* Повышение эффективности режущего инструмента путем направленного изменения параметров структуры и свойств материала износостойкого покрытия : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.08 / В. П. Табаков. — Ульяновск, 1992. — 641 с.
20. *Табаков, В. П.* Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями в условиях стесненного резания / В. П. Табаков, Д. И. Сагитов. — Ульяновск : УлГТУ, 2015. — 179 с.
21. Решение проблем при фрезеровании // Sandvik Coromant. — URL: <https://www.sandvik-coromant.com/ru> (дата обращения: 24.03.2026).
22. *Болотников, Г. В.* Современные покрытия для твердосплавного режущего инструмента / Г. В. Болотников // СТИН. — 1994. — № 4. — С. 33—37.
23. Diamond-Like Carbon Coatings on Plasma Nitrided M2 Steel: effect of deposition parameters on adhesion properties / M. R. S. de Oliveira [et al.] // arXiv.org. — 2018. — URL: <https://arxiv.org/abs/> (date of access: 25.03.2026).
24. *Григорьев, С. Н.* Методы повышения стойкости режущего инструмента / С. Н. Григорьев. — М. : Машиностроение, 2009. — 368 с.
25. *Волосова, М. А.* Систематизация методов нанесения покрытий и модификации рабочих поверхностей режущего инструмента и алгоритм их выбора / М. А. Волосова, А. А. Туманов // Вестн. МГТУ Станкин. — 2011. — № 3 (15). — С. 78—83.
26. Поверхностное упрочнение режущего инструмента. — URL: <http://sverlite.ru/?p=2537> (дата обращения: 23.03.2026).
27. *Степанова, Т. Ю.* Технологии поверхностного упрочнения деталей машин : учеб. пособие / Т. Ю. Степанова. — Иваново : Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2009. — 64 с.
28. Модифицирование материалов и покрытий наноразмерными алмазосодержащими добавками / П. А. Витязь, В. И. Жорник, В. А. Кукареко [и др.]. — Мн. : Бел. наука, 2011. — 522 с.
29. Технологии конструкционных наноструктурных материалов и покрытий / П. А. Витязь, А. Ф. Ильющенко, М. Л. Хейфец [и др.] ; под общ. ред. П. А. Витязя и К. А. Солнцева. — Мн. : Бел. наука, 2011. — 283 с.
30. *Хейфец, М. Л.* Проектирование процессов комбинированной обработки / М. Л. Хейфец. — М. : Машиностроение, 2005. — 272 с.
31. Анализ свойств отношений технологических решений при проектировании комбинированных методов обработки материалов / П. И. Ящерицын [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. — 2001. — Т. 45, № 4. — С. 106—109.
32. Химико-термическая обработка металлов / Ю. М. Лахтин, Б. Н. Арзамасов. — М. : Металлургия, 1985. — 256 с.
33. *Достанко, А. Н.* Модификация поверхности твердых тел в неравновесной газоразрядной плазме / А. Н. Достанко, М. Н. Босьяков, С. А. Кухарев. — Мн. : АрмитаМаркетинг : Менеджмент, 1996. — 95 с.
34. *Тихонов, А. К.* Основные направления развития азотирования в мире / А. К. Тихонов, Н. В. Богданова // Материаловедение. — 2001. — № 3. — С. 53—56.
35. *Босьяков, М. Н.* Газодинамические характеристики тлеющего разряда при ионном азотировании / М. Н. Босьяков, А. А. Козлов // Наука и техника. — 2018. — Т. 17, № 5. — С. 368—377.
36. *Саханько, С. А.* Технологические особенности ионного азотирования изделий из инструментальных сталей для горячей и холодной обработки / С. А. Саханько, М. Н. Босьяков, М. В. Нерода // Вестник Брестского государственного технического университета. Машиностроение. — 2018. — № 4 (112). — С. 13—15.
37. Исследование и оптимизация параметров процессов плазменной химико-термической обработки изделий машиностроения / М. Н. Босьяков, С. А. Бондаренко, А. С. Бондаренко [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 2 кн. — Мн. : Физ.-техн. ин-т НАН Беларуси, 2021. — С. 81—104.
38. *Кухарева, Н. Г.* Получение высокобористых диффузионных покрытий на углеродистых сталях / Н. Г. Кухарева, С. Н. Петрович, Г. В. Стасевич // Металлургия : Респ. межвед. сб. науч. тр. — Мн. : БНТУ, 2013. — Вып. 34, ч. 2. — С. 9—15.
39. *Лабунец, В. Ф.* Износостойкие боридные покрытия / В. Ф. Лабунец, Л. Г. Ворошнин, М. В. Киндарчук. — Киев : Техника, 1989. — 158 с.
40. Физические основы термоциклического борирования / А. М. Гурьев, Э. В. Козлов, Л. Н. Игнатенко, Н. А. Попова. — Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2000. — 216 с.
41. *Майоров, В. С.* Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / В. С. Майоров, С. В. Майоров, М. Ю. Стернин. — М. : Физ.-мат. лит., 2009. — 664 с.

42. On the formation features, structure, microhardness and tribological behavior of single tracks and coating layers formed by laser cladding of Al-Fe powder bronze / O. G. Devojno, M. A. Kardapolava, N. I. Lutsko, E. Feldshtein // *Surface and Coatings Technology*. — 2019. — Vol. 358. — P. 195—206.
43. Технология формирования износостойких покрытий на железной основе методами лазерной обработки / О. Г. Девойно, М. А. Кардаполова, А. С. Калиниченко [и др.]. — Мн. : Бел. нац. техн. ун-т, 2020. — 280 с.
44. Инженерия поверхностей конструкционных материалов с использованием плазменных и пучковых технологий / А. В. Белый, А. С. Калиниченко, О. Г. Девойно, В. А. Кукареко ; НАН Беларуси, Физ.-техн. ин-т, Объедин. ин-т машиностроения, Бел. нац. техн. ун-т. — Мн. : Бел. наука, 2017. — 457 с.
45. Восстановление износа деталей машин : учебник / В. А. Горохов, О. Г. Девойно, В. П. Иванов [и др.]. — Старый Оскол : Тонкие наукоемкие технологии, 2020. — 380 с.
46. Модификация плазменных износостойких покрытий импульсным лазером / В. А. Оковитый, Ф. И. Пантелеенко, А. И. Шевцов [и др.] // *Вестник Брестского государственного технического университета. Машиностроение*. — 2009. — № 4 (58). — С. 49—53.
47. Алифанов, А. В. Механизм упрочнения легированных сталей в импульсном магнитном поле / А. В. Алифанов, Ж. А. Попова, Н. М. Ционенко // *Литье и металлургия*. — 2012. — № 4 (68). — С. 151—155.
48. Магнитострикционный механизм образования мелкодисперсной структуры в стальных изделиях при магнитно-импульсном воздействии / А. В. Алифанов, Д. А. Ционенко, А. М. Милюкова, Н. М. Ционенко // *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук*. — 2016. — № 4. — С. 31—36.
49. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка материалов / А. В. Алифанов, А. М. Милюкова, А. Н. Матяк [и др.] // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 2 кн.* — Мн. : Физ.-техн. ин-т НАН Беларуси, 2021. — С. 127—153.
50. Горчанин, А. И. Повышение эффективности упрочняющей магнитно-импульсной обработки ножей со сложным профилем лезвия / А. И. Горчанин, А. М. Милюкова, А. А. Лях // *Вестник БарГУ. Серия «Технические науки»*. — 2019. — № 7. — С. 43—48.
51. Левашов, Е. А. Многофункциональные наноструктурированные пленки / Е. А. Левашов, Д. В. Штанский // *Успехи химии*. — 2007. — Т. 76, № 5. — С. 501—509.
52. Наноструктурированные и нанокompозитные сверхтвердые покрытия / А. Д. Коратаев, В. Ю. Мошков, С. В. Овчинников [и др.] // *Физическая мезомеханика*. — 2005. — Т. 8, № 5. — С. 103—116.
53. Kivak, T. Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts / T. Kivak // *Measurement*. — 2014. — Vol. 50, no. 1. — P. 19—28.
54. Сравнительный анализ свойств покрытий на основе углерода, полученных различными PVD и CVD методами осаждения / Д. В. Корженко, Ю. Н. Юрьев, Д. Р. Емлин, С. А. Плотников // *Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине : сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 30 сент. — 4 окт. 2019 г.* / Нац. исслед. Том. политехн. ун-т. — Томск : Нац. исслед. Том. политехн. ун-т, 2019. — С. 179—180.
55. Acquisition and properties of wear-resistant PVD/CVD coatings on a hard-alloy tool / I. V. Blinkov, V. N. Anikin, M. I. Petrzlik [et al.] // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. — 2011. — Vol. 52, no. 1. — P. 109—114.
56. Мицирук, О. М. Гибридные лазерно-плазменные технологии упрочнения / О. М. Мицирук, А. И. Веремейчик, М. В. Нерода // *Актуальные вопросы машиноведения*. — 2023. — Т. 12. — С. 275—278.
57. Сермин, В. Г. Гибридная технология повышения эксплуатационных свойств рабочих поверхностей деталей машин / В. Г. Сермин // *Школа молодых новаторов : сб. науч. ст. 6-й Междунар. науч. конф. Перспектив. разработок молодых ученых : в 3 т., Курск, 16 июня 2025 г.* — Курск : Университет. кн., 2025. — Т. 1. — С. 303—306.
58. Применение гибридных технологий для реновации и повышения ресурса деталей судовых машин и механизмов / А. В. Дудан, Т. В. Ворона, М. С. Агеев, Б. А. Ляшенко // *Вестник Брестского государственного технического университета. Машиностроение*. — 2015. — № 4 (94). — С. 18—22.
59. Zagonel, L. F. Microstructure of tool steel after low temperature ion nitriding / L. F. Zagonel, E. J. Mittemeijer, F. Alvarez // *Materials Science and Technology*. — 2009. — Vol. 25, no. 6. — P. 726—732. — DOI: 10.1179/174328408X332780.
60. Zagonel, L. F. Tool steel ion beam assisted nitrocarburization / L. F. Zagonel, F. Alvarez // *Materials Science and Engineering: A*. — 2007. — Vol. 465, no. 1—2. — P. 194—198. — DOI: 10.1016/j.msea.2007.02.048.
61. Effect of Carbon on the Compound Layer Properties of AISI H13 Tool Steel in Pulsed Plasma Nitrocarburizing / R. L. O. Basso, C. A. Figueroa, L. F. Zagonel [et al.] // *Plasma Processes and Polymers*. — 2007. — Vol. 4, Suppl. 1. — P. S728—S731. — DOI: 10.1002/ppap.200731806.
62. Grill, A. Nitriding of AISI M2 tool steel in an inductive r.f. plasma / A. Grill, D. Itzhak // *Thin Solid Films*. — 1983. — Vol. 101. — P. 219—222.
63. Малевич, А. В. Влияние комбинированной обработки ионно-плазменным азотированием и магнитно-импульсной обработкой на макро- и микронапряжения в стали 38Х2МЮА / А. В. Малевич, Л. Л. Сотник, И. А. Богданович // *Вестник БарГУ. Серия «Технические науки»*. — 2025. — № 2 (18). — С. 44—51.

Поступила в редакцию 02.04.2026.

УДК 539.197; 674.055:621.934:630.652

**В. В. Чаевский<sup>1</sup>**, кандидат физико-математических наук, доцент,  
**А. В. Белый<sup>2</sup>**, доктор технических наук, академик Национальной академии наук Беларуси, профессор,  
**О. Г. Рудак<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»,  
ул. Гикало, 9, 220013 Минск, Республика Беларусь, v.chaevskij@bsuir.by

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, ул. Я. Коласа, 22, 220013 Минск, Республика Беларусь

<sup>3</sup>Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», ул. Свердлова, 13а,  
220006 Минск, Республика Беларусь

## ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ TiAlN КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ДЕРЕВОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

В работе рассмотрены характеристики структуры и свойств покрытий TiAlN, сформированных на твердосплавных (WC – 3 вес. % Co) ножах дереворежущего инструмента катодно-ионной бомбардировкой (arc-PVD). Микроструктура покрытий была исследована методами дифракции отражённых электронов и вторичной ионной масс-спектрометрии, проведены измерения микротвердости покрытий, выполнены опытно-промышленные испытания образцов. Толщина сформированных покрытий TiAlN составила  $1,81 \pm 0,20$  мкм. Покрытия имеют столбчатую структуру и не перемешиваются с твердосплавной основой. TiAlN-покрытия содержат  $\alpha$ -Al-фазу. Максимальная величина микротвердости TiAlN-покрытия составила 1 700...1 800 HV<sub>0,1</sub>. Наличие алюминия в TiAlN-покрытиях способствует образованию внешнего оксидного слоя Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, улучшающего их трибологические свойства.

**Ключевые слова:** TiAlN; покрытия; WC – 3 вес. % Co; дереворежущий инструмент; оксид алюминия.

Рис. 4. Библиогр.: 14 назв.

**V. V. Chayevski<sup>1</sup>**, PhD Physics and Mathematics, Associate Professor,

**A. V. Byeli<sup>2</sup>**, Doctor of Technical Sciences, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Professor,

**O. G. Rudak<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 9 Gikalo Str., 220013 Minsk,  
the Republic of Belarus, v.chaevskij@bsuir.by

<sup>2</sup>Belarusian National Technical University, 22 Yakub Kolas Str., 220013 Minsk, the Republic of Belarus

<sup>3</sup>Belarusian State Technological University, 13a Sverdlova Str., 220006 Minsk, the Republic of Belarus

## TiAlN-BASED COATINGS AS PROMISING SYSTEMS FOR WOOD-CUTTING TOOLS

**Abstract.** The paper discusses the characteristics of the structure and properties of TiAlN coatings formed on hard alloy tungsten carbide (WC – 3 wt. % Co) knives of the KIB woodcutting tool (arc-PVD). The coatings microstructure has been studied using EBSD and SIMS methods, and the coatings micro hardness has been measured, as well as experimental and industrial tests of the samples. The thickness of the formed TiAlN coatings was  $1.81 \pm 0.20$   $\mu$ m. The coatings have a columnar structure and do not mix with the carbide base. TiAlN coatings contain a  $\alpha$ -Al phase. The maximum TiAlN coatings micro hardness was 1,700...1,800 HV<sub>0.1</sub>. The presence of aluminum in TiAlN coatings contributes to the formation of an external Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oxide layer, which improves their tribological properties.

**Key words:** TiAlN; coatings; WC – 3 wt. % Co; woodcutting tools; aluminum oxide.

Fig. 4. Ref.: 14 titles.

**Введение.** Режущие инструменты во время применения должны выдерживать высокие температуры (до 1 000 °С), трение и износ, коррозию и окисление, а также механическую и термическую усталость. В режущих и износостойких инструментах используются твердые сплавы WC–Co, сочетающие в себе превосходную твердость с высокой прочностью и износостойкостью, и имеют большое промышленное применение [1]. Однако твердые сплавы содержат карбидные и металлические фазы. Поэтому в этих композитах существует вероятность сильной гальванической коррозии из-за локального увеличения температуры во время процесса резки или обработки поверхности твердосплавных инструментов, что приводит к преимущественному растворению металлической фазы и остаточного карбидного скелета

и деградации инструмента с течением времени [2]. Нанесение защитных покрытий является подходящим способом защиты твердых сплавов от повреждения окружающей средой и окислительного износа. В работе В. Kucharska и соавторов изучено влияние различных типов твердосплавных лезвий и толщины защитных покрытий TiAlN/a-C:N, TiAlN и TiN/AlTiN, используемых в деревообрабатывающей промышленности, на производительность резания [3]. В исследовании использовались три типа твердосплавных лезвий WC-Co с различным содержанием кобальта. Установлено, что наилучшими прочностными характеристиками обладают лезвия ножей, покрытые 5 мкм покрытиями TiN/AlTiN по сравнению с твердосплавной основой без покрытий. Полученные методами физического и химического осаждения из паровой фазы (PVD и CVD) покрытия на основе TiAlN охватывают большую область применений для режущих инструментов [4]. В настоящее время проводится много исследований свойств многослойных систем на основе TiAlN (AlTiN/TiSiN, TiN-TiAlN-CrAlN, TiAlVN, TiAlN/AlCrN и др.) [5; 6]. Эти композитные покрытия являются одним из перспективных вариантов для следующего поколения износостойких покрытий благодаря своей сверхвысокой твердости, износостойкости и стойкости к окислению, а также превосходным эксплуатационным характеристикам при резании. С практической точки зрения очень важно, что при изменении содержания Al в покрытии TiAlN улучшаются его механические и трибологические свойства за счет стимулирования образования внешнего слоя Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> во время операций обработки [7].

В данной работе исследовалась структура и физико-механические свойства TiAlN-покрытий, синтезированных катодно-ионной бомбардировкой (arc-PVD) методом на поверхности твердосплавных ножах WC-Co фирмы Leitz фрезы для дереворежущего инструмента.

**Методология и методы исследования.** В данной работе на поверхности серийных двухлезвийных твердосплавных WC-Co-ножах фирмы Leitz концевой фрезы дереворежущего инструмента были сформированы TiAlN-покрытия. Проведенные ранее исследования с использованием таких ножей показали, что состав ножей представляет собой твердый сплав карбида вольфрама WC – 3 вес. % Co [8; 9].

TiAlN-покрытия были синтезированы методом катодно-ионной бомбардировкой (arc-PVD) на установке «Булат» по стандартной методике в два этапа. Предварительно подложка обрабатывалась ионами титана в вакууме 10<sup>-3</sup> Па при потенциале подложки –1 кВ с последующим нанесением покрытий при опорном напряжении –70 В и токах горения дуг катодов 80 А (Ti) и 50...60 А (Al) в атмосфере азота при давлении 1,5 · 10<sup>-3</sup> Па. Температура при осаждении соответствовала 723...773 К.

Исследование структурно-фазового состояния образца твердого сплава с покрытием TiAlN проводили на рентгеновском дифрактометре POWDIX 600 в отфильтрованном кобальтовом (Co-K<sub>α</sub>) излучении. Рентгеновскую съемку по схеме Брегга—Бреттано осуществляли в непрерывном режиме со скоростью 0,01 град / с при напряжении 30 кВ и анодном токе рентгеновской трубки 15 мА. Для расшифровки фазового состава использовали картотеку PDF-2. При обработке данных рентгеноструктурного анализа использовали программы автоматизированного программного комплекса Crystallographica Search-Match и High Score Plus Demo.

Морфология покрытий TiAlN и элементный состав образцов TiAlN/WC-Co исследовались методами сканирующей электронной микроскопии, энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии, дифракции отражённых электронов с использованием электронного микроскопа Hitachi S-4800 и вторичной ионной масс-спектрометрии с использованием масс-спектрометра.

Для определения микротвердости осажденного покрытия использовался метод Виккерса, основанный на вдавливании четырехгранной алмазной пирамидой с углом при вершине 136°. Измерения твердости по Виккерсу проводились на твердомере DuraScan-20 при нагрузке на индентор 100 г.

Опытно-промышленные испытания на период стойкости режущих двухлезвийных твердосплавных WC-Co-ножей многоразового использования фрезы с покрытием TiAlN были

проведены на чашко-зарежном станке «ФОРМАТ-250» при обработке пиломатериалов хвойных пород на предприятии «Лельчицкий лесхоз» (Гомельская область, Республика Беларусь).

**Результаты исследования и их обсуждение.** Дифрактограмма полученных TiAlN-покрытий на WC-Co-подложке показана на рисунке 1. Покрытие содержит только TiAlN-фазу. В полученных AlTiN преобладает текстура диагональной плоскости (111).

Морфология сформированного TiAlN-покрытия характерна для ионно-плазменных покрытий. Покрытие тоже повторяет рельеф основы (рисунок 2, а). Характерные следы полос, изначально присутствующих на подложке, наблюдаются и на поверхности TiAlN-покрытия. Для всех ионно-плазменных TiAlN-покрытий на поверхности можно наблюдать большое количество мелких макрочастиц. Установлено [10], что плотность этих частиц незначительно уменьшается с увеличением соотношения Al : Ti в покрытии. Данные по химическому составу поверхности исследуемых покрытий приведены на рисунке 2, б, и в таблице 1. Видно, что в поверхностном слое сформированных покрытий практически отсутствует алюминий: концентрация титана — 60 вес. %, алюминия — 4 вес. %. Поэтому цвет покрытия образца похож на цвет покрытий TiN.

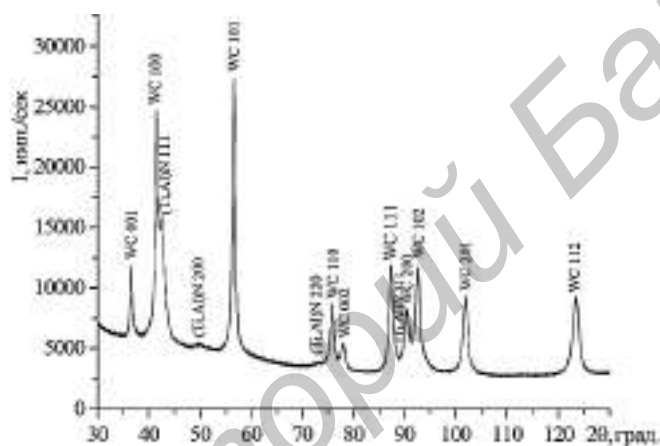
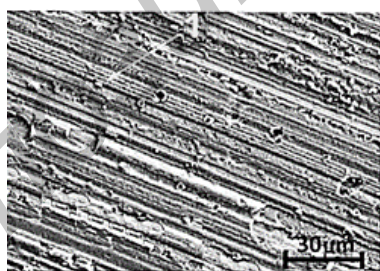
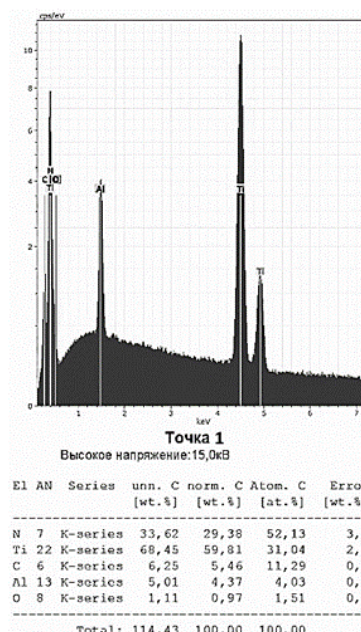


Рисунок 1. — Дифрактограмма TiAlN-покрытия



а)



б)

Рисунок 2. — Поверхность TiAlN-покрытия: морфология (а), элементный состав (б)

Т а б л и ц а 1. — Химический состав исследуемого покрытия TiAlN

Концентрация элементов, вес. %				
C	N	Ti	Al	O
5	30	60	4	1

Однако присутствие алюминия в синтезированных TiAlN-покрытиях доказывают проведенные исследования их состава по глубине (рисунок 3).

TiAlN-покрытия с очень низким содержанием алюминия являются привлекательными с точки зрения исследования их характеристик и применения. В работе [11] были синтезированы TiAlN-покрытия с низким содержанием Al (в пределах 6...8 ат. %) и изучены их характеристики.

СЕМ-изображения поперечного излома образца (см. рисунок 3, б) показывают, что сформированное покрытие TiAlN имеет толщину ~ 1,8 мкм, равномерно осаждено на твердосплавную основу WC-Co, перемешивание с основой отсутствует (см. рисунок 3, в).

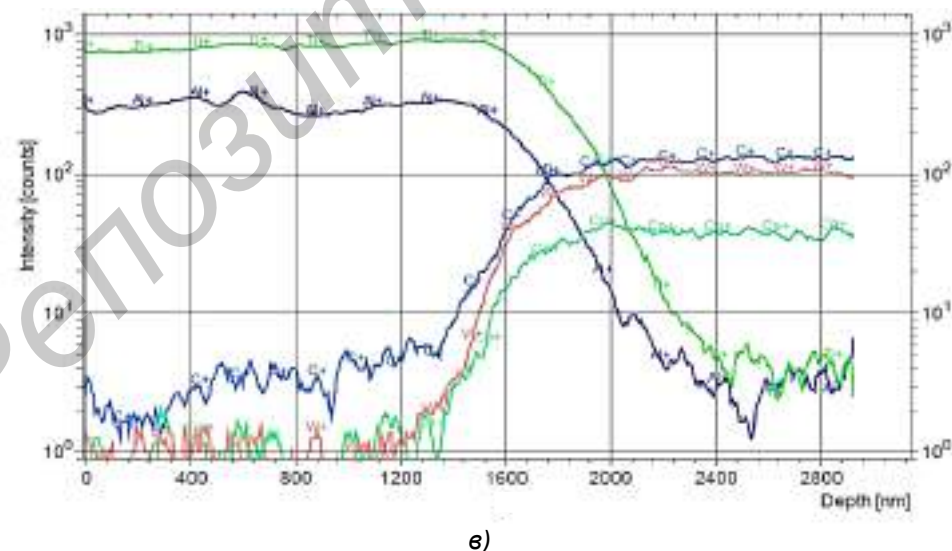
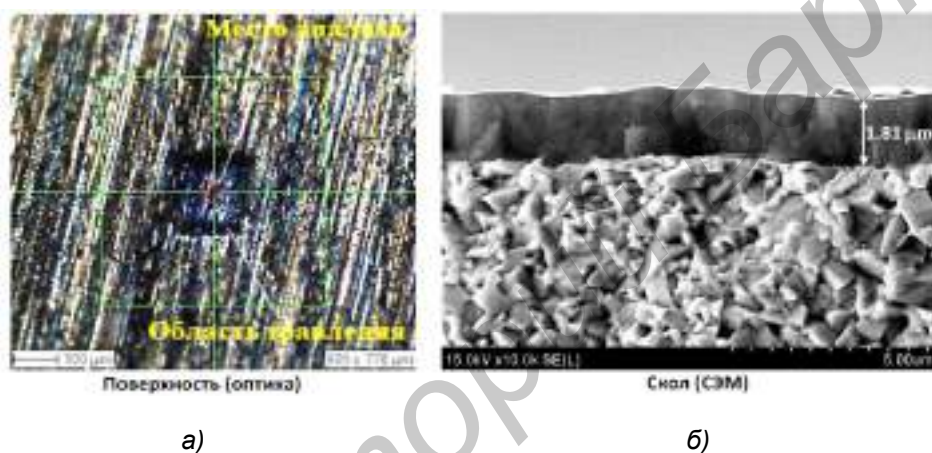


Рисунок 3. — Структура образца: кратер вытравливания (а) и распределение характеристического рентгеновского излучения Ti, Al, N, C, W и Co по глубине (в) методом вторичной ионной масс-спектрометрии, снимок скола образца TiAlN/WC-Co (б)

Рисунок 3, б, также показывает плавный характер уменьшения кривой распределения характеристического рентгеновского излучения Ti и Al к границе «покрытие—подложка». Поэтому можно сделать вывод о достаточно высокой адгезии сформированного TiAlN-покрытия с основой.

Проведенные в нашей работе исследования структуры образца TiAlN/WC-Co методом дифракции отраженных электронов (рисунок 4) показывают отсутствие влияния WC-Co-основы на столбчатую структуру TiAlN-покрытия, тем самым подтверждая результаты работы [3]. Сформированное покрытие TiAlN также не влияет на ориентацию зерен твердосплавной основы WC-Co, которая является хаотичной из-за процессов спекания твердого сплава или имеет определенные направления по определенным плоскостям [12] (плоскость 0001 в нашей работе).

Сформированные TiAlN-покрытия имеют достаточно высокое значение микротвердости — 1 700...1 800 HV<sub>0,1</sub>, находящееся в сопоставимом диапазоне с твердостью изученных систем на основе TiAlN (~ 20...23 ГПа) [1; 13].

Исследования TiAlN-покрытий [14] показали, что даже при незначительном содержании алюминия в покрытии они представляют собой оксидный слой, созданный между интерфейсом «инструмент—заготовка», тем самым придавая этому покрытию высокую стойкость к окислению и износостойкость. Поэтому проведенные опытно-промышленные испытания фрезы с модифицированными (TiAlN/WC – 3 вес. % Co) ножами фирмы Leitz на предприятии «Лельчицкий лесхоз» при резании заготовок из древесины хвойных и лиственных пород, а также других предприятиях, использующих модифицированные фрезы с покрытиями на основе TiAlN и подобными покрытиями, увеличивают период стойкости инструмента.

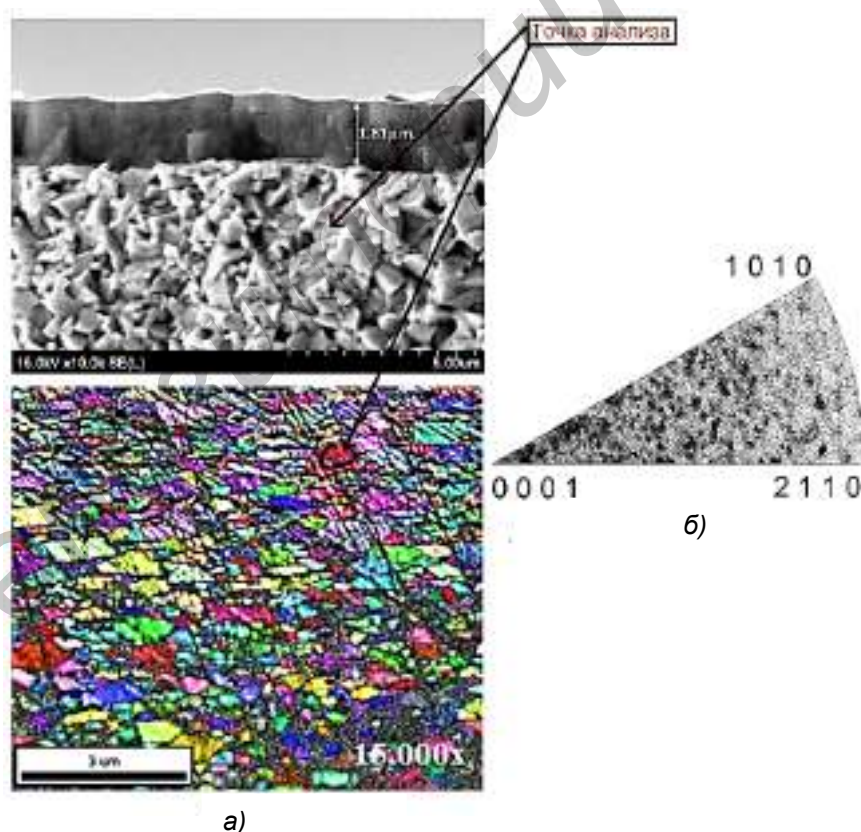


Рисунок 4. — РЭМ-снимок скола образца TiAlN/WC-Co с указанием точки анализа кристаллографической ориентации зерен WC-Co (а), текстура используемого в работе сплава WC-Co (б)

**Заключение.** Методом катодно-ионной бомбардировки на твердосплавных (WC – 3 вес. % Co) ножах дереворежущего инструмента, ножах фрезерного инструмента сформированы TiAlN-покрытия. TiAlN содержат только  $\alpha$ -Al-фазу. Полученные покрытия имеют столбчатую структуру и не перемешиваются с твердосплавной основой. Значение микротвердости сформированных на фрезерных ножах покрытий имеют значение 1 700...1 800 HV<sub>0,1</sub> и соответствуют диапазону изученных систем на основе TiAlN. В TiAlN-покрытиях наличие алюминия способствует образованию внешнего оксидного Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-слоя, улучшающего их трибологические свойства. Поэтому проведенные опытно-промышленные испытания фрез с покрытиями TiAlN на твердосплавных (WC – 3 вес. % Co) ножах при резании заготовок из древесины хвойных и лиственных пород на предприятии «Лельчицкий лесхоз» показывают, что использование многокомпонентных систем (TiAlN и др.) на модифицированном инструменте способствует увеличению ресурса их работы, тем самым повышает эффективность предприятий лесного комплекса Республики Беларусь.

#### Список цитируемых источников

1. Cemented carbide microstructures: a review / J. García, V. Collado Ciprés, A. Blomqvist, B. Kaplan // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. — 2019. — Vol. 80. — P. 40—68.
2. *Derakhshandeh, M. R.* Recent developments in the new generation of hard coatings applied on cemented carbide cutting tools / M. R. Derakhshandeh, M. J. Eshraghi, M. Razavi // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. — 2023. — Vol. 111. — 106077.
3. Influence of Different Types of Cemented Carbide Blades and Coating Thickness on Structure and Properties of TiN/AlTiN and TiAlN/a-C:N Coatings Deposited by PVD Techniques for Machining of Wood-Based Materials / B. Kucharska [et al.] // *Materials*. — 2021. — Vol. 14. — 2740.
4. *Aditharajan, N.* Recent advances and challenges associated with thin film coatings of cutting tools: a critical review / N. Aditharajan, B. Radhika, R. Saleh // *Transactions of the Institute of Metal Finishing*. — 2022. — Vol. 101 (1). — P. 1—18.
5. *Sampath Kumar, T.* Metallurgical Characteristics of TiAlN/AlCrN Coating Synthesized by the PVD Process on a Cutting Insert / T. Sampath Kumar, S. Balasivanandha Prabu, G. Manivasagam // *Journal of Materials Engineering and Performance*. — 2014. — Vol. 23. — P. 2877—2884.
6. Improving the mechanical and tribological properties of TiAlSiN coatings by annealing / Z. Qiong [et al.] // *Vacuum*. — 2023. — Vol. 214 (31). — 112249.
7. Structure, mechanical and tribological properties of sputtered Ti<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N coatings with  $0.5 \leq x \leq 0.75$  / K. Kutschej [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. — 2005. — Vol. 200. — P. 2358—2365.
8. Structural and mechanical properties of the ZrC/Ni-nanodiamond coating synthesized by the PVD and electroplating processes for the cutting knives / V. Chayauski, V. Zhylinski, O. Cernashejus [et al.] // *Journal of Materials Engineering and Performance*. — 2019. — Vol. 28. — P. 1278—1285.
9. Preparation and characterization of the Cr-nanodiamonds/ MoN coatings with performant mechanical properties / V. Chayauski, A. Taleb [et al.] // *Coatings*. — 2022. — Vol. 12, iss. 7. — 1012.
10. *Akhter, Rumana.* Improving the wear resistance and scratch adhesion strength of TiAlN coatings via Al incorporation / Rumana Akhter, Avi Bendavid, Paul Munroe // *Thin Solid Films*. — 2025. — Vol. 816. — 140650.
11. Properties of TiAlN Coatings Obtained by Dual-HiPIMS with Short Pulses / A. Grenadyorov [et al.] // *Materials*. — 2023. — Vol. 16. — 1348.
12. Структура и свойства крупнозернистых сплавов WC–Co с особо однородной микроструктурой / Е. И. Замулаева, А. А. Зайцев, И. Ю. Коняшин, Е. А. Левашов // *Известия вузов. Цветная металлургия*. — 2019. — № 4. — С. 70—78.
13. Characteristics and Wear Mechanisms of TiAlN-Based Coatings for Machining Applications: A Comprehensive Review / V. F. C. Sousa, F. J. G. Da Silva, G. F. Pinto [et al.] // *Metals*. — 2021. — Vol. 11. — 260.
14. Tribological properties of (Ti, Al)N coatings deposited at different bias voltages using the cathodic arc technique / A. N. Kale, K. Ravindranath, D. C. Kothari, P. M. Raole // *Surface Coating Technology*. — 2001. — Vol. 145. — P. 60—70.

Поступила в редакцию 06.04.2026.

**PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS**

УДК 631.3

**В. А. Бурдейко**

Учреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Войкова, 21,  
225404 Барановичи, Республика Беларусь, +375 (29) 562 74 05, V\_A\_Victor@mail.ru

**РАСЧЕТ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОНИЧЕСКОЙ ЩЕТКИ  
ДЛЯ ОЧЕСЫВАНИЯ КОЛОРАДСКОГО ЖУКА**

В статье представлено теоретическое обоснование и расчет эффективного кинематического показателя конической щетки, ворсинки которой действуют на листья картофельной ботвы в процессе очесывания с них особей колорадского жука. Приведено построение рациональной траектории движения ворсинки конической щетки, воздействующей на листья картофельной ботвы в момент очесывания с нее вредителей.

**Ключевые слова:** картофель; колорадский жук; коническая щетка; машина; очесывание; ворсинка; расчет; скорость; траектория; кинематический показатель.

Рис. 3. Библиогр.: 9 назв.

**V. A. Burdeyko**

Institution of Education "Baranavichy State University", 21 Voykova Str., 225404 Baranavichy, the Republic of  
Belarus, +375 (29) 562 74 05, V\_A\_Victor@mail.ru

**CALCULATION OF KINEMATIC PARAMETERS OF A CONICAL  
BRUSH FOR HARVESTING COLORADO POTATO BEETLE**

The article presents a theoretical justification and calculation of the effective kinematic parameter of a conical brush, whose bristles act on the leaves of potato foliage during the process of brushing off Colorado potato beetles. It includes the construction of a rational trajectory for the movement of the bristles of the conical brush, influencing the potato foliage at the moment of pest removal.

**Key words:** potato; Colorado potato beetle; conical brush; machine; combing; bristle; calculation; speed; trajectory; kinematic indicator.

Fig. 3. Ref.: 9 titles.

**Введение.** Выращиванию экологически чистого картофеля в последнее время в мире уделяется большое внимание. Из этого следует, что органическое сельское хозяйство, преследующее целью получение экологически чистой продукции, — одно из самых динамично развивающихся направлений мирового аграрного производства. Зеленая экономика уже давно стала центральной темой в глобальной повестке дня производства сельскохозяйственных продуктов. Беларусь не отстает от мирового тренда. 9 ноября 2018 года Президент Республики Беларусь подписал Закон Республики Беларусь № 144-З «О производстве и обращении органической продукции». В главе 1 «Общие положения» (ст. 4) говорится, что «объектами отношений в области производства и обращения органической продукции являются семена и процессы производства и обращение органической продукции» [1].

Развитие экологического (органического) земледелия, одним из методов которого является механический сбор колорадского жука, актуально и перспективно.

Основными рабочими органами машины для очесывания колорадского жука являются коническая щётка, лоток и два эластичных копира.

Авторы В. А. Бурдейко, В. Б. Ловкис в своих исследованиях приводят сведения о машине для очесывания особей колорадского жука, ее рабочих органах, расчеты параметров машины, математическое моделирование процесса удаления колорадского жука с ботвы [2—7].

Исследованием технологической операции сбора и утилизации колорадского жука занимались ученые П. П. Казакевич, В. К. Пестис, Э. В. Заяц, П. В. Заяц, С. Н. Ладутько. На кафедре механизации сельскохозяйственного производства учреждения образования «Гродненский государственный аграрный университет» разработана машина для сбора и утилизации колорадского жука.

**Материалы и методы исследования.** При проектировании машины для сбора колорадского жука необходимо рационально выполнить компоновку ее составных частей. Правильная установка рабочих органов влияет одновременно на производительность и качество работы машины. Наиболее эффективными рабочими органами являются конические щетки, имеющие более сложную конструкцию по сравнению с другими рабочими органами [8].

Анализ известных конструкций машин для сбора колорадского жука и их рабочих органов позволяет сделать вывод о том, что данные машины малопродуктивны, имеют высокую металлоемкость и энергопотребление, а также низкое качество работы: 30...45 % особей колорадского жука остается на картофельном поле, из них приблизительно половина вредителей остается на картофельной ботве, а остальная часть сыпается на поверхность гребня вокруг стеблей картофеля. Чтобы устранить вышеуказанные недостатки, разработана конструкция машины для сбора колорадского жука с рабочими органами нового типа.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Наиболее перспективными рабочими органами являются комбинированные очесывающе-вибрационные или очесывающе-ударные на основе применения эластичных материалов для снижения травмирования ботвы. Для повышения полноты сбора целесообразно применять конические щетки с регулировкой углов наклона вертикальной оси вращения щетки в продольном направлении, т. е. вдоль траектории движения щетки для очесывания колорадского жука с листьев картофельной ботвы в различных направлениях в зависимости от сорта картофеля и периода его роста [2].

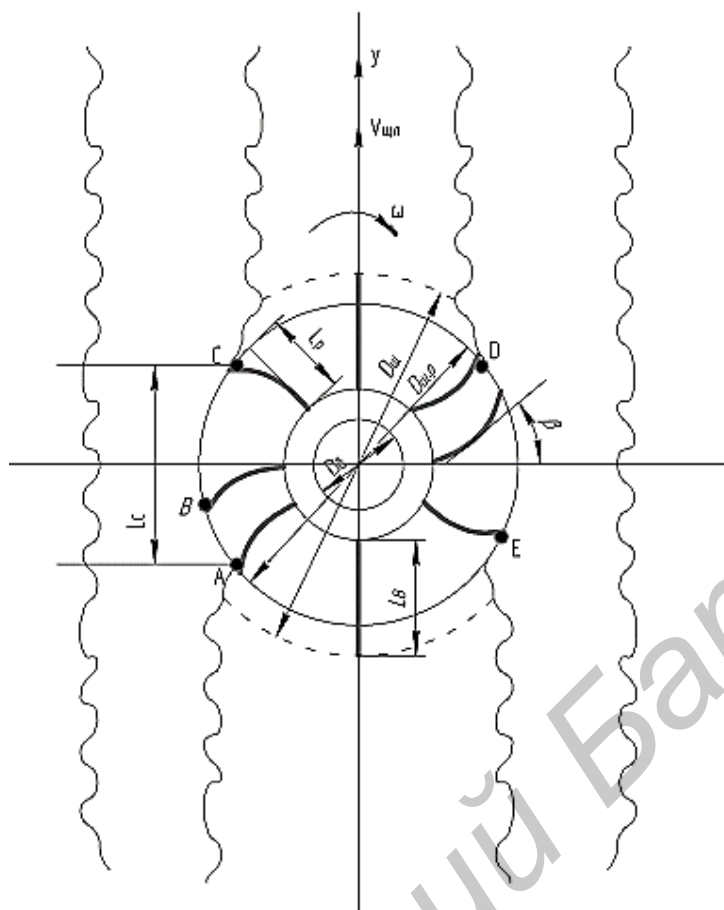
Рабочими органами в машине для сбора колорадского жука служат конические щетки, гофрированные боковины и рифленые пруты-ударники. Конусообразная щетка выполнена в форме перевернутого усеченного конуса и закреплена на вертикальной оси с возможностью свободного вращения. Диаметр большего основания конуса — от 0,35 до 0,60 м, меньшего — 0,05...0,15 м. Непосредственное воздействие на листву картофеля оказывают ворсинки, изготовленные из капроновой нити диаметром 0,5...2,0 мм [9].

Воздействие ворсинок на листья ботвы зависит от линейной и угловой скоростей щеток. В момент касания ворсинки щетки о листья ботвы происходит удаление особей колорадского жука путем очесывания.

В процессе удаления колорадского жука при движении щетки ее ворсинки, очесывая нижнюю поверхность листьев картофельной ботвы, удаляют вредителей, которые попадают в желоб.

Во время работы щетка (рисунок 1) вращается с угловой скоростью  $\omega$ , очесывая особи колорадского жука ворсинками одновременно с листьев картофельной ботвы как с левого, так и с правого рядов. Началом захвата особей вредителя ворсинками происходит в момент нахождения рабочих поверхностей ворсинок в точках *A* и *D*. В точках *C* и *E* особи срываются с листьев картофельной ботвы и в конечном итоге, потеряв кинетическую энергию, падают в желоб машины за счет собственной силы тяжести. Ворсинка в расправленном состоянии при холостом ходе движения имеет длину  $L_B$ , а в рабочем положении длина ворсинки составляет величину  $L_P$ . Диаметр щетки в рабочем положении имеет величину  $D_{щ.р}$ . Длина рабочей зоны щетки составляет  $L_C$ .

Эффект удаления вредителей зависит от силы сцепления ворсинок щетки первоначально с поверхностью листьев картофельной ботвы, а затем с особями колорадского жука, а также от шероховатости вредителей и листьев. Чем больше сила сцепления ворсинок и чем меньше шероховатость листьев, тем эффективнее может быть произведен очес вредителей.



**Рисунок 1. — Схема очесывания особей колорадского жука с листьев картофельной ботвы в междурядье (вид сверху)**

Коническая щетка представляет собой внешнюю форму усеченного конуса, на поверхности которого закреплены полипропиленовые ворсинки диаметром от 0,5 до 1,2 мм и длиной 50 мм. Такая щетка будет работать эффективно, если окружная скорость ее достаточна для бесподпорного очесывания (15...25 м/с) и соблюдается необходимое соотношение между конструктивными и кинематическими параметрами машины для очесывания колорадского жука. Для определения этого соотношения важно знать, какой формы траекторию оставляет точка ворсинки конической щетки при ее перемещении.

Так как форма траектории будет повторяться, изобразим часть ее, соответствующую времени полного оборота ворсинки вокруг оси вращения щетки, при условии, что линейная скорость ворсинки больше скорости поступательного движения машины для очесывания колорадского жука.

Окружность, на которой расположена ворсинка щетки, разобьем на 12 равных частей (рисунок 2). Пусть точка  $A$  — начальное положение ворсинки, а  $t$  — время, в течение которого ворсинка пробегает  $1/12$  длины окружности. Скорость машины за время  $t$  изобразим вектором  $V$ .

В результате вращения щетки за время  $t$  ворсинка  $A$  перейдет в точку  $A_1$ , которая при поступательном движении машины за то же время переместится в такую точку  $B_1$ , что  $A_1B_1 = t$ . В результате сложного движения ворсинка  $A$  займет положение точки  $B_1$ . За время  $2t$  ворсинка  $A$  займет положение такой точки  $B_2$ , что  $A_2B_2 = 2t$ . Аналогично найдем положение ворсинки через  $3t$ , ...,  $12t$ . Оно определится, соответственно, точками  $B_3$ , ...,  $B_{12}$ . Соединив построенные точки плавной кривой, получим вид траектории абсолютного движения ворсинки (полученная кривая — циклоида).

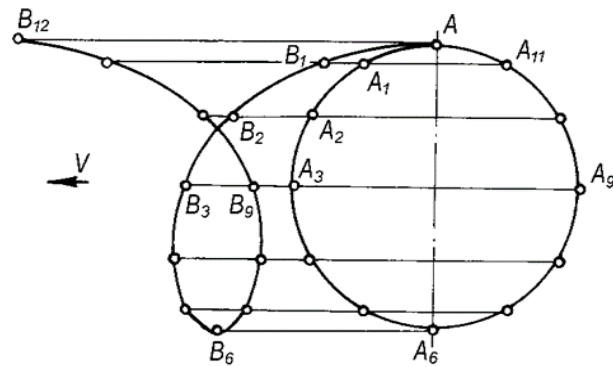


Рисунок 2. — Образование траектории движения ворсинки щетки

Рассмотрим работу двух противоположных ворсинок щетки, которые одновременно очесывают левый и правый ряды картофельной ботвы в прямоугольной системе координат с осями  $X$  и  $Y$  (рисунок 3). Уравнения движения точек  $A$  и  $B$  ворсинки  $1$  имеют следующий вид:

$$\begin{cases} X_A = Vt + r_0 \sin \varphi; \\ Y_A = r_0 \cos \varphi; \end{cases}$$

$$\begin{cases} X_B = Vt + r_1 \sin \varphi; \\ Y_B = r_1 \cos \varphi. \end{cases}$$

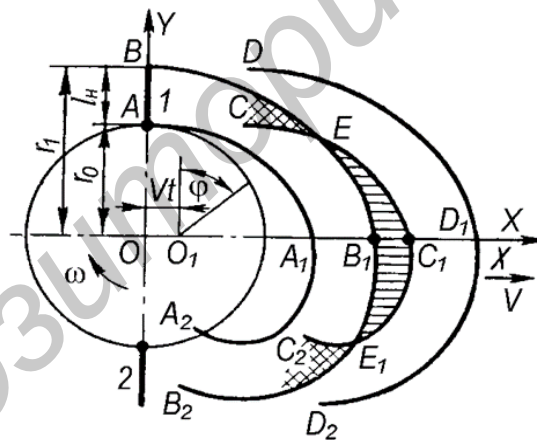


Рисунок 3. — Расчетная схема для определения параметров конической щетки

Движение ворсинки  $1$  соответствует траекториям  $AA_1A_2$  и  $BB_1B_2$ , между которыми она очесывает особь вредителя.

Ворсинка  $2$  движется по траекториям  $CC_1C_2$  и  $DD_1D_2$ . В зонах, где траектории крайних точек соседних ворсинок перекрываются, происходит повторный прогон ворсинкой обработанной площади листьев картофельной ботвы (заштриховано крестообразно).

Если траектория  $CC_1C_2$  расположена впереди  $BB_1B_2$ , то на площадке  $EC_1E_1B_1$  (на рисунке заштриховано) особи не будут очесаны, что может привести к незначительному забиванию щетки вредителями и снижению эффективности ее работы. Для высококачественного очесывания необходимо, чтобы отклонение ботвы щеткой было равно нулю, для чего  $OB_1 \geq OC_1$ . Определим, какому показателю кинематического режима ( $\lambda = \omega r_0 / V$ ) соответствует это условие [6].

Так как  $OB_1 = X_{B_1}$ ;  $OC_1 = X_{C_1}$ , то, исходя из вышеприведенного условия, имеем  $X_{B_1} \geq X_{C_1}$ .

Точке  $B_1$  соответствует  $\varphi = \pi / 2$ , тогда  $t = \pi / 2\omega$ , а  $X_{B_1} = V \frac{\pi}{2\omega} + r_1$ , или  $X_{B_1} = r_0 \left( \frac{\pi}{2\lambda} + \frac{r_1}{r_0} \right)$ .

Принимая число ворсинок равным  $z$  и учитывая, что траектории движения точек  $A$  и  $C$  описываются одним и тем же уравнением, имеем  $X_{C_1} = r_0 \left( \frac{\pi(4+z)}{2z\lambda} + 1 \right)$ .

Заменяя в неравенстве  $X_{B_1}$  и  $X_{C_1}$  их выражениями и решая, находим  $\lambda \geq \frac{2\pi}{z \left( \frac{r_1}{r_0} - 1 \right)}$ .

Так как  $r_1 = r_0 + l_n$  (здесь  $l_n$  — длина ворсинки), то имеем  $\lambda \geq \frac{2\pi r_0}{z l_n}$ ,  $\lambda \geq \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 200}{3 \cdot 50} \approx 8,4$ .

Из полученного неравенства следует, что для высококачественного очеса целесообразно увеличивать линейную скорость щетки. Но при возрастании  $\omega r_0$  повышается число повторного холостого хода соседней ворсинки, очесывающей лист картофельной ботвы в зоне, где предыдущая ворсинка удалила особь вредителя, из-за чего снижается эффективность работы щетки и незначительно повышаются энергозатраты. Для работы конической щетки необходимо минимально допустимое значение  $\lambda \approx 8,4$ , что обеспечивает рабочие скорости до 7 км / ч.

Длина  $l_n$  ворсинки является взаимосвязанным параметром с радиусом щетки. Определим ее из условия работы щетки без пропусков (площадок, по которым ворсинка не проходила).

Учитывая, что перемещение машины за время одного оборота щетки  $L = V t_{об}$ , а время оборота  $t_{об} = 2\pi / \omega$ , определим подачу  $L$ :

$$L = \frac{2\pi V}{\omega} = \frac{2\pi r_0}{\lambda},$$

$$L = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 200}{8,4} = 149,5 \text{ мм}.$$

При одной ворсинке в один ряд по окружности щетки будут получаться пропуски неочесанных особей колорадского жука, если длина ворсинки  $l_n$  меньше подачи  $L$ . При  $z$  ворсинок необходимо, чтобы  $l_n \geq L / z$ .

Подставляя, получим  $50 \geq 49,8$ .

Однако если  $l_n \gg L / z$ , то длина рабочей части ворсинки увеличится, что приведет к снижению усилия очеса ворсинкой, а значит, особь колорадского жука может остаться на листе картофельной ботвы, тем самым снизится эффект очесывания вредителей картофеля.

**Заключение.** Теоретически обоснован эффективный кинематический показатель работы конической щетки, который можно рассчитать по вышеприведенным формулам. Чтобы повысить эффективность очесывания особей колорадского жука с листьев картофельной ботвы, необходимо корректировать параметры конической щетки, т. е. можно изменить диаметр барабана щетки и длину ворсинки.

#### Список цитируемых источников

1. О производстве и обращении органической продукции : Закон Респ. Беларусь от 9 нояб. 2018 г. № 144-З : принят Палатой представителей 2 окт. 2018 г. : одоб. Советом Респ. 24 окт. 2018 г. // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. — 17.11.2018. — 2/2582.

2. *Бурдейко, В. А.* Расчет щеток машины для сбора колорадского жука / В. А. Бурдейко, В. Б. Ловкис // Вестник БарГУ. Серия «Технические науки». — 2021. — Вып. 9.
3. *Бурдейко, В. А.* Результаты предварительных испытаний новых рабочих органов машины для сбора колорадского жука / В. А. Бурдейко, И. В. Дубень // Техника и технологии: инновации и качество : материалы V Междунар. науч.-практ. конф., 20 дек. 2018 г., Барановичи, Респ. Беларусь / редкол.: В. В. Климук (гл. ред.), Ю. Е. Горбач (отв. ред.) [и др.]. — Барановичи : БарГУ, 2018.
4. *Бурдейко, В. А.* Машина для удаления колорадского жука / В. А. Бурдейко, И. М. Дыдышко // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе — сегодня и завтра : сб. науч. ст. 6-й Междунар. науч.-практ. конф., 2 нояб. 2022 г., Гомель. — Гомель : Гомсельмаш, 2022. — С. 233—237.
5. *Бурдейко, В. А.* Техническая характеристика ворсинок щетки для счесывания колорадского жука / В. А. Бурдейко, В. Б. Ловкис // Техническое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве : материалы Междунар. науч.-практ. конф., 24—25 нояб. 2022 г., Минск. — Мн. : БГАТУ, 2023.
6. *Бурдейко, В. А.* Расчёт параметров лотка и копиров машины для сбора колорадского жука / В. А. Бурдейко, В. Б. Ловкис, Э. В. Дыба // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межвед. темат. сб. / Нац. акад. наук Беларуси ; РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». — Вып. 57. — Мн. : Бел. наука, 2024. — С. 225—228.
7. *Бурдейко, В. А.* Математическое моделирование удаления колорадского жука применением устройства с очесывающей конической щеткой / В. А. Бурдейко, В. Б. Ловкис // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию образования БГАТУ, Минск, 16—17 окт. 2024 г. — Мн. : БГАТУ, 2024.
8. *Бурдейко, В. А.* Перспективные рабочие органы машин для сбора колорадского жука / В. А. Бурдейко // Техника и технологии: инновации и качество : материалы III Междунар. науч.-практ. конф., 18 дек. 2015 г., Барановичи, Респ. Беларусь. — Барановичи : БарГУ, 2015. — С. 7—8.
9. *Бурдейко, В. А.* Машина и рабочие органы для сбора колорадского жука / В. А. Бурдейко, И. В. Дубень // Вестник БарГУ. Серия «Технические науки». — 2018. — Вып. 6. — С. 87—91.

Поступила в редакцию 02.04.2026.

УДК 631.363.5

**П. Ю. Крупенин<sup>1</sup>**, кандидат технических наук, доцент,**А. В. Китун<sup>2</sup>**, доктор технических наук, профессор<sup>1</sup>Учреждение образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия», ул. Мичурина, 5, 213407 Горки, Республика Беларусь, pavel@krupenin.com<sup>2</sup>Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет», пр-т Независимости, 99, 220023 Минск, Республика Беларусь, ktmg@batu.edu.by

## АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ РОТОРА САМОВСАСЫВАЮЩЕГО ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Гидродинамические аппараты роторного типа являются эффективным устройством для комплексного воздействия на обрабатываемую среду. Данные устройства применяются для измельчения различных материалов в жидкости, приготовления высокодисперсных суспензий и эмульсий, интенсификации массообменных процессов, гомогенизации и обеззараживания жидкостей.

Перспективным вариантом конструктивного исполнения гидродинамического аппарата роторного типа является использование самовсасывающей схемы, предполагающей установку лопастей во внутренней полости ротора, что позволит отказаться от использования вспомогательного насосного оборудования, а это снизит энерго- и материалоемкость технологической установки для гидроимпульсной обработки кормов. На величину потерь энергии при течении жидкости в гидравлическом тракте аппарата влияют не только размеры, но и форма межлопастных и периферийных каналов ротора.

В статье описаны теоретические исследования, результатом которых являются аналитические выражения, позволяющие описать геометрический профиль проточной части ротора самовсасывающего гидродинамического аппарата.

**Ключевые слова:** гидродинамический аппарат; роторно-импульсный аппарат; приготовление кормов; кавитация; аналитическая геометрия.

Рис. 5. Библиогр.: 12 назв.

**P. Y. Krupenin<sup>1</sup>**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,**A. V. Kitun<sup>2</sup>**, DSc in Technical Sciences, Professor<sup>1</sup>Belarusian State Agricultural Academy,

5 Michurina Str., 213407 Horki, the Republic of Belarus, pavel@krupenin.com

<sup>2</sup>Belarusian State Agrarian Technical University,

99 Nezalezhnosti Ave., 220023 Minsk, the Republic of Belarus, ktmg@batu.edu.by

## ANALYTICAL DESCRIPTION OF THE GEOMETRIC PROFILE OF THE ROTOR FLOWING PART OF A SELF-PRIMING HYDRODYNAMIC APPARATUS

Rotary hydrodynamic devices are effective devices for complex treatment of the medium being processed. These devices are used for grinding various materials in liquids, preparing highly dispersed suspensions and emulsions, intensifying mass transfer processes, and homogenizing and disinfecting liquids.

A promising design option for a rotary hydrodynamic device is the use of a self-priming system, which involves installing blades within the rotor cavity. This eliminates the need for auxiliary pumping equipment, thereby reducing the energy and material consumption of the hydropulse treatment system for feed. Energy losses during fluid flow in the device's hydraulic circuit are influenced not only by the size but also by the shape of the rotor's interblade and peripheral channels.

This article describes theoretical studies that resulted in analytical expressions that allow to describe the geometric profile of the rotor flowing part of a self-priming hydrodynamic device.

**Key words:** hydrodynamic apparatus; rotary-pulse apparatus; feed preparation; cavitation; analytical geometry.

Fig. 5. Ref.: 12 titles.

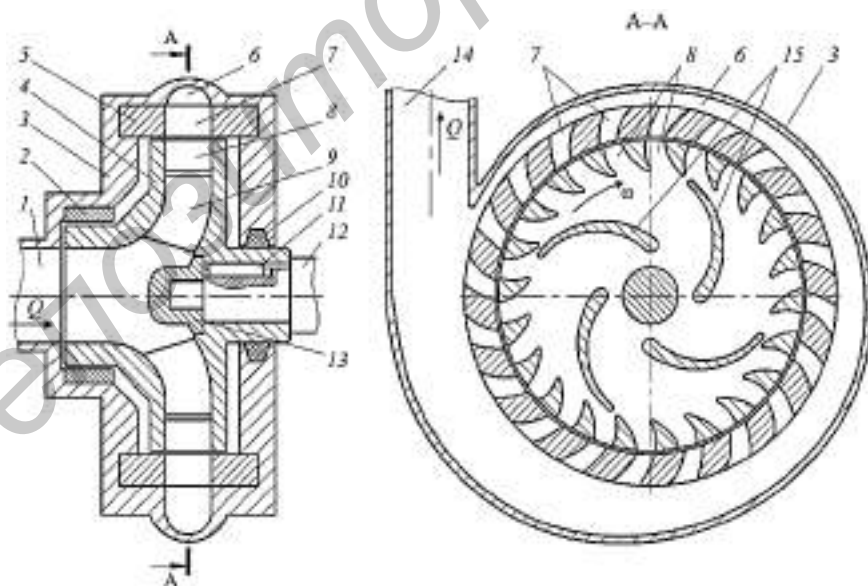
**Введение.** Гидродинамические аппараты роторного типа являются эффективным устройством для комплексного воздействия на обрабатываемую среду. Данные устройства применяются для измельчения различных материалов в жидкости, приготовления высоко-

дисперсных суспензий и эмульсий, интенсификации массообменных процессов, гомогенизации и обеззараживания жидкостей [1]. Вышеперечисленные свойства гидродинамических аппаратов могут быть использованы в сельском хозяйстве для приготовления высокодисперсных кормов и кормовых добавок, пастеризации молочного корма для телят, подготовки субстратов для биогазовых комплексов, производства органических и комплексных удобрений [2; 3].

Импульсный, сопровождаемый кавитационными эффектами характер движения жидкой среды в комплексе с режуще-стирающим воздействием рабочих элементов роторно-импульсного аппарата на частицы твердой фазы суспензии обеспечивают комплексную обработку материала, включающую в себя факторы механического, гидроимпульсного и кавитационного воздействий. Существует несколько методик расчета параметров роторно-импульсного аппарата для интенсификации одного или нескольких из перечисленных воздействий на обрабатываемый материал [4—6], однако для применения любой из них необходимо знать закономерности движения жидкости или суспензии по каналам ротора и статора.

**Методология и методы исследования.** Перспективным вариантом конструктивного исполнения гидродинамического аппарата роторного типа является использование самовсасывающей схемы, предполагающей установку лопастей 15 (рисунок 1) во внутренней полости ротора 4, что позволит отказаться от использования вспомогательного насосного оборудования, а это снизит энерго- и материалоемкость технологической установки для гидроимпульсной обработки кормов [7; 8].

Повышение эффективности гидроимпульсной обработки корма и сокращение производительных затрат энергии может быть обеспечено плавным изменением скаляра и направления относительной скорости движения жидкости в проточном тракте аппарата посредством согласования кинематических параметров потока при прохождении им границ «межлопастной канал — периферийный канал» и «канал ротора — канал статора».



1 — входной патрубок; 2 — кольцо; 3 — корпус; 4 — ротор; 5 — статор; 6 — камера статора (отвод); 7 — каналы статора; 8 — периферийные каналы ротора; 9 — межлопастные каналы; 10 — уплотнение; 11 — шпонка; 12 — вал; 13 — гайка; 14 — выходной патрубок; 15 — лопасти

**Рисунок 1.** — Конструктивно-технологическая схема самовсасывающего гидродинамического аппарата

На величину гидравлических потерь энергии при течении жидкости в гидравлическом тракте аппарата влияют не только размеры, но и форма межлопастных 9 и периферийных 8 каналов ротора, следовательно, необходимо установить зависимости, позволяющие аналитически описать криволинейную форму элементов проточной части аппарата [9; 10].

**Результаты исследования и их обсуждение.** Для аналитического описания геометрических характеристик проточной части ротора построим средние линии профиля лопастей 15, проходящие через центры вписанных в профиль лопасти окружностей [11]. В целях описания средней линии профиля лопасти с помощью математической функции примем на линии лопасти  $C_1D_1$  (рисунок 2) произвольную точку  $A_1$  и обозначим ее координаты в полярной системе координат как  $(r; \varphi)$ . Произведем малое приращение угла  $d\varphi$  и соответствующее ему приращение радиуса  $dr$ , в результате чего получим точку  $A'_1(r + dr; \varphi + d\varphi)$  и составим уравнение малых приращений:

$$d\varphi = \frac{dr}{r \operatorname{tg} \beta_{\text{л}}(r)}; r_1 \leq r \leq r_2, \tag{1}$$

где  $r$  — радиус ротора (координата полярного радиуса), м;  
 $\beta_{\text{л}}(r)$  — функция угла наклона средней линии профиля лопасти  $\beta_{\text{л}}$  от радиуса  $r$ , рад;  
 $r_1, r_2$  — начальный и конечный радиусы лопастной части ротора соответственно, м.  
 Функцию средней линии профиля лопасти  $C_1D_1$  получим интегрированием выражения (1):

$$\varphi_{\text{л}1}(r) = \int_{r_1}^r \frac{1}{r \operatorname{tg} \beta_{\text{л}}(r)} dr; r_1 \leq r \leq r_2. \tag{2}$$

Ввиду того, что линия профиля  $C_2D_2$  следующей лопасти ротора смещена относительно  $C_1D_1$  на угловую величину  $\Delta\varphi_{\text{л}} = 2\pi / z_{\text{л}}$ , выражение (2) можно представить в универсальном, соответствующем любой лопасти ротора виде:

$$\varphi_{\text{л}i}(r) = \int_{r_1}^r \frac{1}{r \operatorname{tg} \beta_{\text{л}}(r)} dr + \frac{2\pi}{z_{\text{л}}}(i_{\text{л}} - 1); r_1 \leq r \leq r_2, \tag{3}$$

где  $z_{\text{л}}$  — число лопастей ротора;  
 $i_{\text{л}}$  — порядковый номер лопасти ротора,  $i_{\text{л}} = 1, 2, 3, \dots, z_{\text{л}}$ .

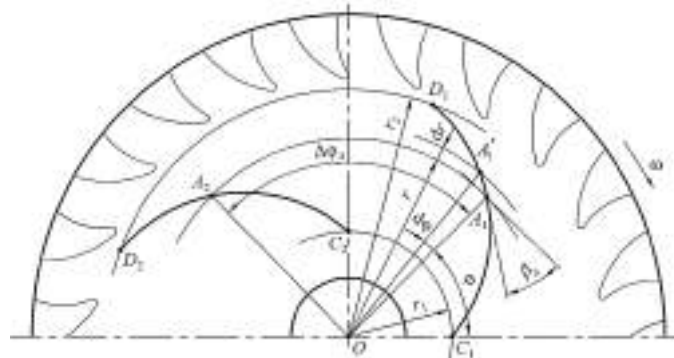


Рисунок 2. — Схема к получению функций средних линий профиля лопастей

Входящую в состав формулы (3) функцию  $\beta_n(r) = f(r, \beta_{n1}, \beta_{n2})$  в теории лопастных насосов [11] допускается представлять в виде линейной или параболической зависимости. В первом случае функция  $\beta_n(r)$  запишется следующим образом:

$$\beta_n(r) = \beta_{n1} + \frac{\beta_{n2} - \beta_{n1}}{r_2 - r_1}(r - r_1); r_1 \leq r \leq r_2,$$

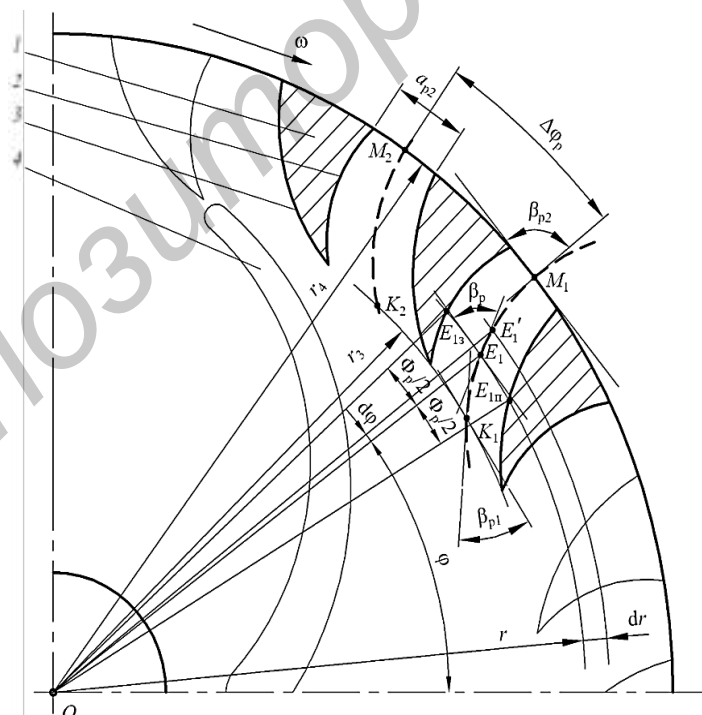
где  $\beta_{n1}, \beta_{n2}$  — углы наклона средней линии профиля лопасти на входе в межлопасть канал и на выходе из него соответственно, рад.

Для описания функциями образующих поверхностей каналов ротора рассмотрим его среднюю линию  $K_1M_1$  (рисунок 3). Выполним малое приращение лежащей на ней точки  $E_1(r; \varphi)$  в точку  $E_1'(r + dr; \varphi + d\varphi)$  и составим его уравнение:

$$d\varphi = \frac{dr}{r \operatorname{tg} \beta_p(r)}; r_3 \leq r \leq r_4, \quad (4)$$

где  $\beta_p(r)$  — функция изменения угла наклона средней линии канала  $\beta_p$  от радиуса  $r$ , рад;  
 $r_3, r_4$  — начальный и конечный радиусы каналов ротора соответственно, м.  
 Функцию средней линии канала  $K_1M_1$  получим интегрированием выражения (4):

$$\varphi_{p1}(r) = \int_{r_3}^r \frac{1}{r \operatorname{tg} \beta_p(r)} dr; r_3 \leq r \leq r_4. \quad (5)$$



1 — лопатка; 2 — задняя поверхность; 3 — передняя поверхность;  
 4 — лопасть

**Рисунок 3. — Схема к получению функций образующих поверхностей каналов ротора**

Ввиду того, что средняя линия  $K_2M_2$  соседнего канала ротора смещена относительно  $K_1M_1$  на угловую величину  $\Delta\varphi_p = 2\pi / z_p$ , выражение (5) можно представить в универсальном, подходящем для любого канала ротора виде:

$$\varphi_{pi_p}(r) = \int_{r_3}^r \frac{1}{r \operatorname{tg} \beta_p(r)} dr + \frac{2\pi}{z_p}(i_p - 1); r_3 \leq r \leq r_4,$$

где  $z_p$  — число каналов ротора;

$i_p$  — порядковый номер канала ротора,  $i_p = 1, 2, 3, \dots, z_p$ .

Функцию угла наклона средней линии канала  $\beta_p(r)$  по аналогии с лопастной частью ротора представим в виде линейного закона изменения угла  $\beta_p$  от входного (начального) значения  $\beta_{p1}$  до выходного (конечного)  $\beta_{p2}$ :

$$\beta_p(r) = \beta_{p1} + \frac{\beta_{p2} - \beta_{p1}}{r_4 - r_3}(r - r_3); r_3 \leq r \leq r_4,$$

где  $\beta_{p1}, \beta_{p2}$  — угол наклона средней линии канала на входе в канал (радиус  $r = r_3$ ) и выходе из него ( $r = r_4$ ) соответственно, рад.

Рассмотрим точки  $E_{1п}$  и  $E_{1з}$  (см. рисунок 3), лежащие, соответственно, на образующих линиях передней 3 и задней 2 поверхностей канала ротора и имеющие одинаковые с точкой  $E_1$  на средней линии канала радиальные координаты. Поскольку линия  $K_1M_1$  является средней линией канала, то угловые координаты точек на поверхности его стенок  $E_{1п}$  и  $E_{1з}$  будут смещены относительно точки  $E_1$  на половину угла  $\Phi_p$  между радиусами-векторами, проведенными к данным точкам из центра  $O$ . С учетом вышеописанного функции образующих линий передней  $\varphi_{pни}(r)$  и задней  $\varphi_{pзи}(r)$  поверхностей каналов ротора можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \varphi_{pни}(r) &= \varphi_{pi_p}(r) - \frac{\Phi_p(r)}{2}; r_3 \leq r \leq r_4; \\ \varphi_{pзи}(r) &= \varphi_{pi_p}(r) + \frac{\Phi_p(r)}{2}; r_3 \leq r \leq r_4, \end{aligned}$$

где  $\Phi_p(r)$  — функция углового размера ширины проточной части канала ротора  $\Phi_p$  от радиуса  $r$ , рад.

Конструктивной особенностью каналов ротора является уменьшение в цилиндрическом сечении доли площади проточной по мере увеличения радиуса данного сечения от  $r_3$  до  $r_4$ . Для учета указанной особенности введем коэффициент стеснения потока лопатками ротора  $\psi_p$ , представляющий собой отношение суммарной площади проточных сечений каналов ротора  $S_{с.п}$  в секущей цилиндрической поверхности радиусом  $r$  к полной площади данной поверхности  $S_c$ , ограниченной внутренними плоскостями переднего и заднего дисков ротора:

$$\psi_p(r) = \frac{S_{с.п}(r)}{S_c(r)} = \frac{z_p r \Phi_p(r) b_p}{2\pi r b_p} = \frac{z_p \Phi_p(r)}{2\pi}; r_3 \leq r \leq r_4, \quad (6)$$

где  $S_{с.п}(r)$  — функция суммарной площади проточных сечений каналов ротора в секущей цилиндрической поверхности радиусом  $r$ ,  $m^2$ ;

$S_c(r)$  — функция полной площади цилиндрической поверхности радиусом  $r$ , ограниченной дисками ротора,  $m^2$ ;

$b_p$  — высота канала ротора,  $m$ .

Значение функции  $\psi_p(r)$  уменьшается от  $\psi_{p1} = 1$  на входе в канал ( $r = r_3$ ) до некоторого минимального значения  $\psi_{p2}$  на выходе из канала ( $r = r_4$ ). Для определения значения коэффициента  $\psi_{p2}$  запишем уравнение, связывающее линейный  $a_{p2}$  и угловой  $\Phi_{p2}$  размеры ширины выходного сечения канала ротора:

$$a_{p2} = 2r_4 \sin \frac{\Phi_{p2}}{2}, \quad (7)$$

где  $a_{p2}$  — ширина выходного сечения канала ротора, м;

$\Phi_{p2}$  — угловой размер ширины выходного сечения канала ротора, рад.

Выразив из (7) угловой размер  $\Phi_{p2}$  и подставив его в качестве значения функции  $\Phi_p(r)$  в формулу (6), получим зависимость для определения коэффициента стеснения потока жидкости на выходе из каналов ротора  $\psi_{p2}$ :

$$\psi_{p2} = \frac{z_p \arcsin \frac{a_{p2}}{2r_4}}{\pi}.$$

Зная значения коэффициента стеснения потока на входе в канал ротора  $\psi_{p1}$  и на выходе из канала  $\psi_{p2}$ , а также при допущении, что изменение значений коэффициента  $\psi_p$  от  $\psi_{p1}$  до  $\psi_{p2}$  в зависимости от радиуса  $r$  подчиняется линейному закону, получим функцию

$$\psi_p(r) = \psi_{p1} + \frac{\psi_{p2} - \psi_{p1}}{r_4 - r_3} (r - r_3); \quad r_3 \leq r \leq r_4. \quad (8)$$

Выполним подстановку функции  $\psi_p(r)$  из формулы (8) в уравнение (6):

$$\psi_{p1} + \frac{\psi_{p2} - \psi_{p1}}{r_4 - r_3} (r - r_3) = \frac{z_p \Phi_p(r)}{2\pi},$$

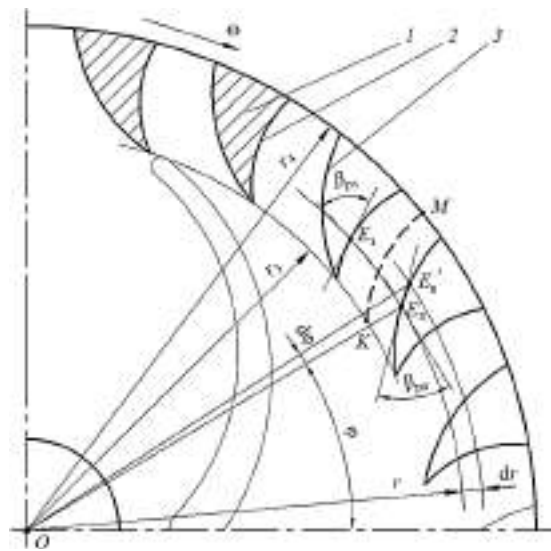
решим его относительно функции  $\Phi_p(r)$ :

$$\Phi_p(r) = \frac{2\pi}{z_p} \left[ \psi_{p1} + \frac{\psi_{p2} - \psi_{p1}}{r_4 - r_3} (r - r_3) \right]; \quad r_3 \leq r \leq r_4.$$

Геометрической особенностью канала ротора является его асимметричность относительно средней линии  $KM$  (рисунок 4), вследствие чего профили его передней  $3$  и задней  $1$  поверхностей различаются, а углы наклона  $\beta_{pn}$  и  $\beta_{pz}$  их образующих линий в равноудаленных от центра  $O$  точках  $E_n$  и  $E_z$  не равны между собой. Для определения угла наклона образующей передней поверхности  $\beta_{pn}$  составим его уравнение малых приращений лежащей на ней точки  $E_{n1}(r; \varphi)$  в точку  $E_{n1}'(r + dr; \varphi + d\varphi)$ :

$$d\varphi = \frac{dr}{r \operatorname{tg} \beta_{pn}(r)}, \quad r_3 \leq r \leq r_4, \quad (9)$$

где  $\beta_{pn}(r)$  — функция изменения угла наклона образующей передней поверхности канала, рад.



1 — лопатка; 2 — задняя поверхность; 3 — передняя поверхность

**Рисунок 4. — Определение углов наклона поверхностей каналов ротора**

Решим уравнение (9) относительно функции  $\beta_{pn}(r)$ :

$$\beta_{pn}(r) = \arctg \left( r \frac{d\varphi_{pn1}}{dr} \right)^{-1} = \arctg \frac{1}{r\varphi'_{pn1}(r)}, \quad r_3 \leq r \leq r_4, \quad (10)$$

где  $\varphi'_{pn1}(r)$  — производная функции образующей линии передней поверхности канала, рад / м.

Ввиду возможности изменения знака у производной  $\varphi'_{pn1}(r)$  и, как следствие, попадания в область значений функции  $\beta_{pn}(r)$  асимптоты тангенса ( $\pi / 2$ ) выражение (10) следует дополнить следующим условием:

$$\beta_{pn}(r) = \begin{cases} \arctg \frac{1}{r\varphi'_{pn1}(r)}, & \varphi'_{pn1}(r) \geq 0; \\ \arctg \frac{1}{r\varphi'_{pn1}(r)} + \pi, & \varphi'_{pn1}(r) < 0. \end{cases}$$

Выполнив аналогичные действия относительно задней поверхности 2 канала, получим функцию  $\beta_{pz}(r)$ , определяющую угол наклона ее образующей линии от координаты радиуса ротора  $r$ :

$$\beta_{pz}(r) = \begin{cases} \arctg \frac{1}{r\varphi'_{pz1}(r)}, & \varphi'_{pz1}(r) \geq 0; \\ \arctg \frac{1}{r\varphi'_{pz1}(r)} + \pi, & \varphi'_{pz1}(r) < 0, \end{cases}$$

где  $\varphi'_{pz1}(r)$  — производная функции образующей линии задней поверхности канала, рад / м.

На рисунке 5 показаны графики функций углов наклона осевой линии канала  $\beta_p(r)$  и образующих его передней  $\beta_{рп}(r)$  и задней  $\beta_{рз}(r)$  поверхностей при входном угле  $\beta_{р1} = 0,267$  рад и выходном  $\beta_{р2} = 1,571$  рад. Из графиков следует, что на протяжении всего канала ротора угол наклона его задней поверхности  $\beta_{рз}$  превышает угол наклона передней поверхности  $\beta_{рп}$ : на входе в канал угол  $\beta_{рз}$  превышает  $\beta_{рп}$  в 1,3 раза, на выходе — в 2,2 раза.

Поскольку в последующих исследованиях потребуется определять геометрические параметры элементов проточной части ротора, выполним перенос описывающих их функций  $\varphi_{ли_n}(r)$ ,  $\varphi_{рп_i}(r)$ ,  $\varphi_{рпii_n}(r)$  и  $\varphi_{рзi_n}(r)$  из полярной системы координат в прямоугольную [12] с получением параметрически заданных функций:

– средняя линия профиля лопасти

$$x_{ли_n}(r) = r \cos(\varphi_{ли_n}(r)); \quad y_{ли_n}(r) = r \sin(\varphi_{ли_n}(r)); \quad r_1 \leq r \leq r_2;$$

– средняя линия канала ротора

$$x_{рi_n}(r) = r \cos(\varphi_{рi_n}(r)); \quad y_{рi_n}(r) = r \sin(\varphi_{рi_n}(r)); \quad r_3 \leq r \leq r_4;$$

– образующая линия передней поверхности канала ротора

$$x_{рпii_n}(r) = r \cos(\varphi_{рпii_n}(r)); \quad y_{рпii_n}(r) = r \sin(\varphi_{рпii_n}(r)); \quad r_3 \leq r \leq r_4;$$

– образующая линия задней поверхности канала ротора

$$x_{рзi_n}(r) = r \cos(\varphi_{рзi_n}(r)); \quad y_{рзi_n}(r) = r \sin(\varphi_{рзi_n}(r)); \quad r_3 \leq r \leq r_4.$$

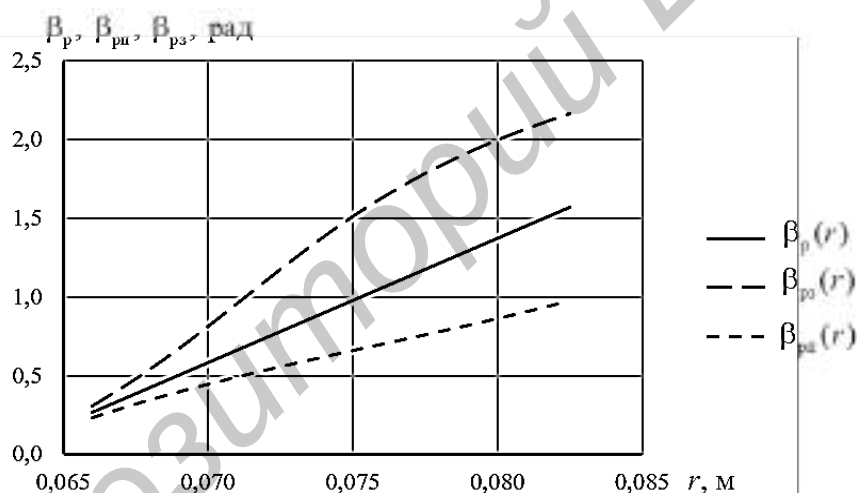


Рисунок 5. — Зависимость углов наклона осевой линии  $\beta_p$ , передней  $\beta_{рп}$  и задней  $\beta_{рз}$  поверхностей канала ротора от радиуса  $r$

**Заключение.** Описание профиля проточной части ротора с помощью математических функций позволило установить, что углы наклона средней линии профиля лопасти ( $\beta_{л1}$ ,  $\beta_{л2}$ ) и осевой линии канала ( $\beta_{р1}$ ,  $\beta_{р2}$ ) оказывают существенное влияние на геометрию межлопастных и рабочих каналов ротора: от углов  $\beta_{л1}$ ,  $\beta_{л2}$  зависит длина и угол раскрытия диффузора межлопастных каналов, от угла  $\beta_{р1}$ ,  $\beta_{р2}$  — длина, средний радиус поворота и угол раскрытия конфузора рабочих каналов ротора. Перечисленные геометрические параметры элементов ротора определяют гидравлическое сопротивление его проточной части, в связи с чем необходимо получить зависимости, устанавливающие связь между углами  $\beta_{л1}$ ,  $\beta_{л2}$ ,  $\beta_{р1}$ ,  $\beta_{р2}$  и показателями эффективности работы гидродинамического аппарата (интенсивность технологических воздействий на обрабатываемый материал, производительность, удельная энергоёмкость и т. п.).

## Список цитируемых источников

1. *Промтов, М. А.* Машины и аппараты с импульсными энергетическими воздействиями на обрабатываемые вещества / М. А. Промтов. — М. : Машиностроение-1, 2004. — 136 с.
2. *Червяков, А. В.* Диспергирование плющеного зерна кукурузы / А. В. Червяков, П. Ю. Крупенин // Комбикорма. — 2009. — № 5. — С. 36—37.
3. *Кулик, А. М.* Биохимические предпосылки совершенствования технологий получения гуминовых кислот / А. М. Кулик, П. Ю. Крупенин // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения : сб. науч. работ. — Брянск : Изд-во Брян. ГАУ, 2022. — Вып. 1 (21). — С. 117—122.
4. *Промтов, М. А.* Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика / М. А. Промтов. — М. : Машиностроение-1, 2001. — 247 с.
5. *Балабудкин, М. А.* Роторно-пульсационные аппараты в химико-фармацевтической промышленности / М. А. Балабудкин. — Л. : Химия, 1983. — 160 с.
6. *Червяков, А. В.* Оптимизация параметров роторно-импульсного кавитационного аппарата для интенсификации диспергирования кормовых смесей / А. В. Червяков, П. Ю. Крупенин // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. — 2014. — № 2. — С. 194—198.
7. *Балабышко, А. М.* Гидромеханическое диспергирование / А. М. Балабышко, А. И. Зимин, В. П. Ружицкий. — М. : Наука, 1998. — 332 с.
8. *Пашко, П. Б.* Обоснование параметров диспергатора с модуляцией потока для подготовки рабочих жидкостей механизированных крепей : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.06 / Пашко Павел Борисович ; Тверской гос. техн. ун-т. — Тверь, 2022. — 145 л.
9. *Ломакин, А. А.* Центробежные и осевые насосы / А. А. Ломакин. — М. : Машиностроение, 1966. — 364 с.
10. *Schröder, V.* Strömungsmaschinen / V. Schröder. — Königsbrunn, 2012. — 295 p.
11. *Кабанов, В. И.* Гидропневматика и гидропривод мобильных машин. Лопастные машины и гидродинамические передачи / В. И. Кабанов. — Мн. : Высш. шк., 1989. — 183 с.
12. *Выгодский, М. Я.* Справочник по высшей математике / М. Я. Выгодский. — М. : АСТ, 2006. — 991 с.

Поступила в редакцию 09.04.2026.

## ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

*Научная концепция журнала предполагает публикацию современных достижений в области технических наук; представление результатов фундаментальных и прикладных исследований, а также результатов, полученных в производственных условиях областей, включая результаты национальных и международных исследований. Статьи аспирантов, докторантов и соискателей последнего года обучения публикуются вне очереди при условии их полного соответствия требованиям, предъявляемым к научным публикациям.*

*Публикация статей в журнале бесплатная.*

*Статьи принимаются на русском, белорусском и английском языках.*

*Подробные правила для авторов представлены на официальном сайте БарГУ (URL: [https://publish.barsu.by/index.php/technik\\_science/index](https://publish.barsu.by/index.php/technik_science/index)).*

## INSTRUCTIONS FOR AUTHORS

*The scientific strategy of the journal suggests publishing modern achievements in the fields of Engineering sciences; presentation of the results of fundamental and applied research, as well as the results obtained under production conditions, both at the domestic and international level. Articles by postgraduate and doctoral students in their final year of traineeship are published out of turn if they are written in strict conformity with the specified requirements.*

*Publication of articles is free.*

*Articles can be written in the Russian, Belarusian or English languages.*

*More detailed instructions for authors can be found on the official website of BarSU (URL: [https://publish.barsu.by/index.php/technik\\_science/index](https://publish.barsu.by/index.php/technik_science/index)).*