

ISSN 2073-7408

# ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО - ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

6 (368) 2024

Редколлегия

Главный редактор

Радченко С.Ю. д-р техн. наук, проф.

Заместители главного редактора:

Барсуков Г.В. д-р техн. наук, проф.

Гордон В.А. д-р техн. наук, проф.

Подмастерьев К.В. д-р техн. наук, проф.

Поляков Р.Н. д-р техн. наук, проф.

Шоркин В.С. д-р физ.-мат. наук, проф.

Члены редколлегии:

Голенков В.А. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Дунаев А.В. д-р техн. наук, доц. (Россия)

Дьяконов А.А. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Емельянов С.Г. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Запомел Я. д-р техн. наук, проф. (Чехия)

Зубчанинов В.Г. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Киричек А.В. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Кузичкин О.Р. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Кухарь В.Д. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Лавриненко В.Ю. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Ли Шэнбо, канд. техн. наук, доц. (Китай)

Мирзалимов В.М. д-р физ.-мат. наук, проф. (Азербайджан)

Пилипенко О.В. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Поляков Р.Н. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Распов В.Я. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Савин Л.А. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Смоленцев В.П. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Солдаткин В.М. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Старовойтов Э.И. д-р физ.-мат. наук, проф. (Беларусь)

Степанов Ю.С. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Хейфен М.Л. д-р техн. наук, проф. (Беларусь)

Ответственный редактор:

Тюхта А.В. канд. техн. наук

Адрес редакции

302030, Орловская обл., г. Орёл, ул.

Московская, 34

+7 (905) 169 88 99

<https://oreluniver.ru/science/journal/fippt>

E-mail: radsu@rambler.ru

Зарег. в Федеральной службе по  
надзору в сфере связи, информационных  
технологий и массовых коммуникаций.  
Свидетельство ПИ № ФС77-67029  
от 30 августа 2016 года

Подписан индекс 29504

по объединенному каталогу

«Пресса России»

на сайтах [www.pressa-rf.ru](http://www.pressa-rf.ru) и [www.aks.ru](http://www.aks.ru)

© ОГУ имени И.С. Тургенева, 2024

Журнал индексируется в системе  
Российского индекса научного цитирования  
РИНЦ, а также в международных системах  
Chemical Abstracts и Google Scholar.

В соответствии с письмом ВАК от 06.12.2022  
№02-1198 «О Перечне рецензируемых  
научных изданий», журнал  
«Фундаментальные и прикладные проблемы  
техники и технологий» как издание,  
входящее в международную базу данных  
Chemical Abstracts, приравнивается к  
изданиям категории К1.

Содержание

Машиностроительные технологии и оборудование

Катунин А.А., Трясцин А.П., Прокошина Т.С., Махова С.А. Анализ и систематизация способов отделочно-упрочняющей обработки.....	3
Куряяцев С.В. Управление процессом развертывания за счет контроля температуры в зоне резания в режиме реального времени .....	9
Голенков В.А., Радченко С.Ю., Дорохов Д.О. Исследование вакуумного старения тонких лент из бериллиевой бронзы.....	15
Барсуков Г.В., Журавлева Т.А., Кожус О.Г., Черепенько А.А., Прасолов Е.А. Исследование процесса кристаллизации частиц медного шлака при высокотемпературной обработке для гидроабразивного резания.....	21
Капырин К.И. Перспективы и проблемы промышленного применения интенсивной пластической деформации: технологии объемного деформирования .....	28
Шоркин В.С., Фроленкова Л.Ю., Ромашин С.Н., Хорошилова М.В., Конищева А.И., Крыгина Е.П. Математическая модель влияния твердой поверхности на вязкость обтекающей ее жидкости .....	43
Барсуков Г.В., Кожус О.Г., Журавлева Т.А., Семин А.С., Черепенько А.А. Управление гидроабразивным резанием по сигналам акустической эмиссии с привлечением методов искусственного интеллекта .....	50

Машиноведение и мехатроника

Шутин Д.В., Литовченко М.Г. Методика и результаты экспериментального подтверждения силовых характеристик триботронных опор роторов в рамках процедур их оптимального проектирования.....	56
Внуков А.В., Родичев А.Ю., Преснцева В.Ю., Родичева И.В., Васильев К.В. Исследование влияния конструктивных и технологических факторов на расход воздуха в бесконтактном уплотнении .....	65
Болгова Е.А., Мукутадзе М.А. Оценка коэффициента трения модифицированной конструкции радиального подшипника при учете скользимости смазочного материала .....	71
Фетисов А.С., Литовченко М.Г. Экспериментальная верификация трибологических характеристик триботронных опор роторов на основе данных свободного выбега ротора.....	79
Поляков Р.Н., Горин А.В. Моделирование работы виброзащитных систем с управляемым демпфированием .....	88
Грибанов Е.Н., Юшкова Э.Ю., Родичев А.Ю., Ананько А.С., Родичева И.В. Автоматизация химического контроля вод, содержащих органические токсики, для роботизированных систем .....	95
Коробко А.В., Калашникова Н.Г. Новые фундаментальные закономерности в двумерных задачах механики .....	101

Приборы, биотехнические системы и технологии

Кандурова К.Ю., Мамошин А.В., Потапова Е.В. Метод и устройство мультиомодальной диагностики функционального состояния печени на основе флуоресцентно-отражательной спектроскопии.....	108
Жидков А.В., Подмастерьев К.В., Денисов Д.В., Абдувосидов Х.А. Исследование импеданса тканей при различной частоте переменного тока .....	118

Контроль, диагностика, испытания и управление качеством

Феоктистов Д.И., Воркунов О.В., Маклеков А.М. Особенности контактного мониторинга температуры электрооборудования .....	127
---	-----

Материалы международной научно-технической конференции  
«Динамика, надежность и долговечность механических  
и биомеханических систем»

Лукина Л.И., Ковалёв Н.И. Нанобиотехнология как один из перспективных методов извлечения тонкодисперсного золота.....	136
Моисеев Д.В., Броховецкий А.А. Эпидемическая модель распространения широковещательных сообщений в транспортных сетях .....	141
Папков С.О. Анализ особенностей напряженного состояния при кручении вала с выточками .....	150
Долголюбян А.В., Матвеенко В.Т., Клименко А.Г. Характеристики когенерационных микрогазотурбинных установок при работе на частичных нагрузках .....	157
Козлов Д.А. Влияние дозы ионного легирования на эксплуатационные свойства стали и сплавов .....	174
Неменко А.В., Никитин М.М. Прогнозные оценки показателей качества при финишной обработке тонкостенных труб .....	180
Дементьев К.В., Поляков А.М., Пахалок В.И., Лазарев В.Б. Разработка системы управления высокоскоростным линейным приводом мехатронного стенда-симулятора для испытаний на износ титальных протезов коленного сустава .....	184

# **Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology**

The founder – Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Educational  
«Orel State University named after I.S. Turgenev»  
(Orel State University)

*Editorial Committee*

*Editor-in-chief*

**Radchenko S.Yu.** Doc. Sc. Tech., Prof.

*Editor-in-chief Assistants:*

**Barsukov G.V.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Gordon V.A.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Podmasteryev K.V.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Polyakov R.N.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Shorkin V.S.** Doc. Sc. Ph. – Math., Prof.

*Member of editorial board:*

**Golenkov V.A.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

**Dunaev A.V.** Doc. Sc. Tech., Assist. Prof. (Russia)

**Dyakonov A.A.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

**Emelyanov S.G.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

**Zapomel Ya.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Czech Republic)

**Zubchaninov V.G.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

**Kirichek A.V.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

**Kuzichkin O.R.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

**Kukhar V.D.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

**Lavrynenko V.Yu.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

**Li Shengbo.** Cand. Sc. Tech., Assist. Prof. (China)

**Mirsalimov V.M.** Doc. Sc. Ph. – Math., Prof. (Azerbaijan)

**Pilipenko O.V.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

**Polyakov R.N.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

**Raspopov V.Ya.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

**Savin L.A.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

**Smolenzov V.P.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

**Soldatkin V.M.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

**Starovotov A.I.** Doc. Sc. Ph. – Math., Prof. (Belarus)

**Stepanov Yu.S.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

**Heifets M.I.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Belarus)

*Responsible editor:*

**Tyukhta A.V.** Candidate Sc. Tech.

*Address*

302030, Oryol region, Oryol, st.

Moskovskaya, 34

+7 (905) 169 88 99

<https://oreluniver.ru/science/journal/fippt>

E-mail: radsu@rambler.ru

Journal is registered in Federal Agency of supervision in sphere of communication, information technology and mass communications. The certificate of registration PI № FS77-67029 from 30.08.2016

Index on the catalogue of the

«Pressa Rossii» 29504

on the websites [www.pressa-rf.ru](http://www.pressa-rf.ru)

and [www.aks.ru](http://www.aks.ru)

© Orel State University, 2024

The journal is indexed in the system of the Russian Science Citation Index (RSCI), and also in international systems Chemical Abstracts and Google Scholar.

In accordance with the letter of the Higher Attestation Commission dated December 6, 2022 No. 02-1198 "On the List of Peer-Reviewed Scientific Publications", the journal Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology, as a publication included in the international Chemical Abstracts database, is equated to publications of the K1 category.

## **Contents**

### **Machine-building technologies and equipment**

<i>Katunin A.A., Tryastsin A.P., Prokoshina T.S., Makhova S.A.</i> Analysis and systematization of methods finishing and strengthening treatment.....	3
<i>Kudryavtsev S.V.</i> Control of the reaming process account of control of temperature in the cutting zone in real time mode.....	9
<i>Golenkov V.A., Radchenko S.Y., Dorohov D.O.</i> Study of vacuum aging of thin beryllium bronze strips.....	15
<i>Barsukov G.V., Zhuravleva T.A., Kozhus O.G., Cherepenko A.A., Prasolov E.A.</i> Study of the crystallization process of copper slag particles during high-temperature treatment for abrasive waterjet cutting.....	21
<i>Kapyrin K.I.</i> Prospects and problems of industrial application of intensive plastic deformation: volume deformation technologies.....	28
<i>Shorkin V.S., Frolenkova L.Yu., Romashin S.N., Khoroshilova M.V., Konisheva A.I., Krygina E.P.</i> Mathematical model of the influence of a solid surface on the viscosity of the fluid flowing around it .....	43
<i>Barsukov G.V., Kozhus O.G., Zhuravleva T.A., Semin A.S., Cherepenko A.A.</i> Waterjet cutting control by acoustic emission signals using artificial intelligence methods.....	50

### **Machine Science and Mechatronics**

<i>Shutin D.V., Litovchenko M.G.</i> Method and results of experimental verification of power characteristics of tribotronic rotor supports within the framework of their optimal design.....	56
<i>Vnukov A.V., Rodichev A.Yu., Presnetsova V.Yu., Rodicheva I.V., Vasilev K.V.</i> Study of the influence of design and technological factors on air flow in a contactless seal .....	65
<i>Bolgova E.A., Mukutadze M.A.</i> Evaluation of the coefficient of friction of a modified radial bearing design taking into account the compressibility of the lubricant.....	71
<i>Fetisov A.S., Litovchenko M.G.</i> Experimental verification of tribological characteristics of tribotronic bearings based on rotor free deceleration data .....	79
<i>Polyakov R.N., Gorin A.V.</i> Simulation of the operation of vibration protection systems in vehicles with controlled damping .....	88
<i>Gribanov E.N., Yushkova E.Yu., Rodichev A.Yu., Ananko A.S., Rodicheva I.V.</i> Automation of chemical control of waters containing organic toxicants for robotic systems .....	95
<i>Korobko A.V., Kalashnikova N.G.</i> New fundamental patterns in two-dimensional problems of mechanics .....	101

### **Devices, biotechnical systems and technologies**

<i>Kandurova K.Y., Mamoshin A.V., Potapova E.V.</i> Method and device for multimodal diagnosis of liver functional state based on fluorescence and reflectance spectroscopy .....	108
<i>Zhidkov A.V., Podmasteryev K.V., Denisov D.V., Abduvosidov H.A.</i> Tissue impedance study at different ac frequencies .....	118

### **Monitoring, Diagnostics, Testing and Quality Management**

<i>Feoklistov D.I., Vorkunov O.V., Makletsov A.M.</i> Features of contact monitoring of electrical equipment temperature .....	127
--	-----

### **Materials of the international scientific and technical conference «Dynamics, reliability and durability of mechanical and biomechanical systems»**

<i>Lukina L.I., Kovalev N.I.</i> Nanobiotechnology as one of the promising methods for extracting fine gold .....	136
<i>Moiseev D.V., Bryukhovetskiy A.A.</i> The epidemic model of the distribution of broadcast messages in transport networks .....	141
<i>Papkov S.O.</i> Analysis of features of stress state during torsion of a shaft with slots .....	150
<i>Dologlonyan A.V., Matvenko V.T., Klimenko A.G.</i> Characteristics of cogeneration micro gas turbine plants when operating at partial loads .....	157
<i>Kozlov D.A.</i> Influence of ion alloying dose on performance properties of steel and alloys ...	174
<i>Nemenko A.V., Nikitin M.M.</i> Forecast estimators of quality factors while thin-walled tubes finishing .....	180
<i>Dementiev K.V., Poliakov A.M., Pakhaluk V.I., Lazarev V.B.</i> Development of high-speed linear drive control system for mechatronic wear test stand for knee joint endoprostheses .....	184

# **МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ**

УДК 621.9

DOI: 10.33979/2073-7408-2024-368-6-3-8

КАТУНИН А.А., ТРЯСЦИН А.П., ПРОКОШИНА Т.С., МАХОВА С.А.

## **АНАЛИЗ И СИСТЕМАТИЗАЦИЯ СПОСОБОВ ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ**

**Аннотация.** В статье представлены результаты анализа существующих способов отделочно-упрочняющего обкатывания неполных сферических поверхностей, способствующих обеспечению высокого качества, характеризующихся высокой производительностью и простотой реализации. Также рассмотрен метод алмазного выглаживания. Обозначена группа конструктивно схожих деталей, для которых могут применяться отделочно-упрочняющие процессы. Представлена кинематическая схема, которая лежит в основе изучаемых способов обкатывания. Рассмотрены используемые в процессе обкатывания виды деформирующих элементов. Основное внимание уделено способам отделочно-упрочняющего обкатывания с самоустанавливающимися (самоцентрирующимися) на обкатываемой сфере инструментами в силу того, что их применение способствует получению качественной сферической поверхности. Установлено, что развитие способов отделочно-упрочняющего обкатывания неполных сферических поверхностей направлено на использование различных комбинаций основных и дополнительных движений инструмента и заготовки. В результате приведена систематизация способов размерно-упрочняющей обработки неполных сферических поверхностей.

**Ключевые слова:** отделочно-упрочняющая обработка, обкатывание, алмазное выглаживание, неполная сферическая поверхность, деформирующие элементы, качество поверхности, систематизация.

### **Введение**

Одной из первостепенных задач машиностроения можно назвать задачу повышения качества и износстойкости поверхностей деталей, решение которой возможно путем совершенствования уже существующих методов и технологий обработки. В силу того, что требования к надежности узлов и деталей машин постоянно повышаются, большое значение приобретают отделочные операции, в значительной степени определяющие их эксплуатационные свойства – износстойкость, коррозионную стойкость, сопротивление контактной усталости, точность и качество сборки и пр. Важную роль в достижении высоких эксплуатационных показателей играют финишные методы механической обработки (шлифование, хонингование, полирование, суперфиниширование). Однако следует отметить, что указанные методы обеспечивают требуемую форму и конфигурацию деталей с указанной точностью, но при этом не позволяют достичь оптимального качества поверхностного слоя. [11]

В последние годы, в промышленности, отделочно-упрочняющая обработка металлических деталей холодным поверхностным пластическим деформированием (ППД) находит все большее применение. Это связано с тем, что при ППД достигаются: высокая чистота поверхности, упрочнение поверхностного слоя, сопровождающееся увеличением твердости, пределов упругости, текучести, прочности, и создание в нем благоприятных остаточных напряжений сжатия. Все это способствует улучшению таких эксплуатационных свойств деталей, как усталостная и коррозионно-усталостная прочность, износстойкость, прочность посадок с натягом, жесткость контактирующих поверхностей, что в совокупности приводит к значительному росту долговечности. В соответствии с [2] методы ППД делят на статические и ударные.

Проведенными экспериментальными исследованиями и наблюдениями за объектами в процессе эксплуатации было установлено, что при условии рационального выбора метода ППД и назначения оптимальных режимов обработки возможно обеспечить повышение ряда эксплуатационных свойств обрабатываемых деталей на 20...50%, а в некоторых случаях в 2...3 раза [14].

Для выполнения анализа эффективных методов отделочно-упрочняющей обработки неполных сферических поверхностей, остановим свое внимание на статических методах выглаживания и упрочняющего обкатывания.

В результате проведенного анализа, целью которого было выявление направлений по

дальнейшему совершенствованию процесса размерной отделочно-упрочняющей обработки неполных сферических поверхностей, было установлено, что в настоящее время существует достаточное количество способов отделочно-упрочняющего обкатывания, требующих систематизации и обобщения. [6-8, 13].

### Основная часть

Разнообразные методы чистовой обработки металлов давлением, в зависимости от принципа взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью, можно свести к двум классам. Первый класс включает в себя процессы, при которых взаимодействие инструмента и детали основано на трении скольжения (выглаживание). Ко второму классу (класс ротационной обработки) относятся процессы, для которых характерно взаимодействие между инструментом и деталью, осуществляющееся путем качения деформирующего элемента по обрабатываемой поверхности. К последнему классу относятся и процессы обкатывания шариками или роликами, широко применяемые при отделочно-упрочняющей обработке неполной сферы шарового пальца современных автомобилей [1, 3-5, 10].

Традиционным способом упрочнения поверхностей деталей является алмазное выглаживание, которое аналогично обработке с помощью шариков или роликов. Суть алмазного выглаживания, в отличие от обработки роликами или шариками в том, что этот процесс происходит в условиях трения скольжения с малым коэффициентом трения.

Эффективность метода алмазного выглаживания для различных материалов в существенной мере обусловливается их исходной структурой.

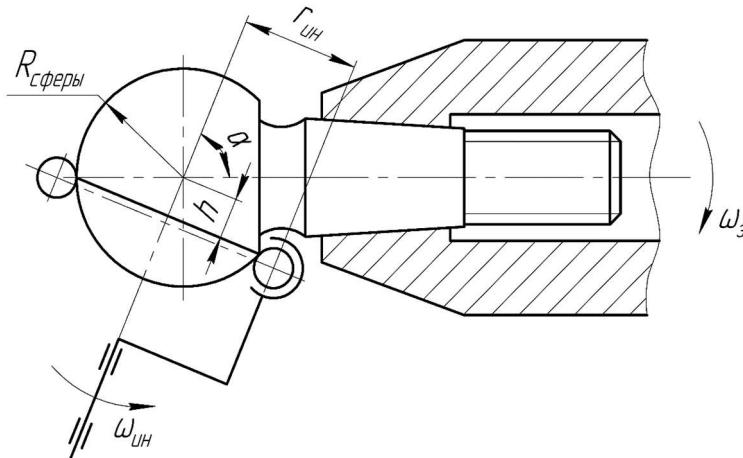
На финишных операциях обработки алмазное выглаживание значительно повышает качество поверхностного слоя деталей, что улучшает их эксплуатационные свойства. Однако следует сказать, что внедрение этого метода в производственный процесс зачастую сдерживается его относительно низкой производительностью из-за небольших значений подачи инструмента (алмазного выглаживателя) и скорости обработки. Путем увеличения скорости обработки можно повысить производительности, но стоит отметить, что этому препятствуют высокая температура в зоне контакта, благодаря которой и улучшается качество поверхности деталей, и не малый расход алмазных инструментов [9].

Отделочно-упрочняющее обкатывание имеет ряд достоинств, таких как высокое качество обработки, надежность инструментов, высокая производительность, а также относительная простота реализации (даже на универсальном оборудовании). Кроме того, обкатывание является одним из немногих методов, с помощью которого можно эффективно обрабатывать неполные сферические поверхности, ограниченные торцовыми срезами. Следует отметить, что отделочно-упрочняющее обкатывание может применяться при обработке большой группы конструктивно подобных автомобильным шаровым пальцам деталей: шариковых подпятников, сферических наконечников штоков, наконечников рулевых тяг, сферических вкладышей бойков механизмов ударного действия, стоек со сферическими головками, сферических соединений рычажных механизмов, штоков клапанных механизмов со сферическими головками и других [6, 7, 8, 12].

Установлено, что общим недостатком этих способов является - неравномерность поверхностного пластического деформирования неполной сферы, которая обусловлена существенной разницей в величинах подачи инструмента на различных ее участках, имеющих разные линейные скорости при обкатывании, а также положением плоскости вращения шариков обкатника. Количество прокатываний деформирующих элементов через полюсную часть, где линейная скорость вращения поверхности головки близка к нулю, значительно больше, чем через экваториальные участки, где скорость максимальна. По этой причине при определенных условиях на полюсной части сферы может иметь место разрыхление и даже отслаивание пластически обработанного (переобкатанного) металла.

В основе рассматриваемых способов обкатывания лежит кинематическая схема, в соответствии с которой ось заготовки с неполной сферической поверхностью (шарового пальца) пресекается с осью инструмента (обкатника) под углом  $\alpha$  в точке, совпадающей с центром обрабатываемой неполной сферы. Обкатник одновременно всеми деформирующими элементами соприкасается с обрабатываемой поверхностью. Ему сообщается вращение по окружности, которая лежит в плоскости, перпендикулярной плоскости осей обкатника и заготовки. Плоскость вращения деформирующих элементов обкатника, касающихся заготовки, смешена относительно центра обрабатываемой сферической поверхности и проходит через ее

полюс и точку пересечения линии торцового среза со сферой (рисунок 1). В этом случае все параллели обрабатываемой неполной сферической поверхности от полюса до торцового среза охватываются деформирующими телами качения обкатника. Заготовке сообщается вращение вокруг собственной оси со скоростью значительно меньшей скорости вращения обкатника. Таким образом, движения заготовки и инструмента составляют основу способов обкатывания неполных сфер.



*Рисунок 1 - Схема обкатывания неполных сферических поверхностей*

Точность формообразования сферы по этой схеме определяется не профилем инструмента, а правильностью траекторий движений заготовки и обкатника, то есть кинематикой процесса, что позволяет получить сферические поверхности с минимальным отклонением от сферичности.

В качестве деформирующих тел качения используются ролики (цилиндрические или конические) или шарики. Особенностью применения роликов является то, что их количество в обкатнике очень ограничено. Последнее обстоятельство может неблагоприятно сказываться на качестве и производительности процесса обкатки. Отделочно-упрочняющее обкатывание шариками выполняется с использованием самоустанавливающихся на сферической поверхности регулируемых и нерегулируемых обкатников (головок) с сепараторами, которые позволяют увеличить число деформирующих элементов, находящихся в контакте с заготовкой. В результате отмечается повышение производительности и качества процесса обработки в сравнении с обкаткой роликами. Однако, присутствие в обкатнике сепаратора усложняет его конструкцию, ограничивает количество деформирующих тел, что, в свою очередь, отрицательно сказывается на производительности и качестве обкатывания.

Конструкция нерегулируемых обкатников более надежна, не так сложна и трудоемка по сравнению с конструкцией регулируемых шариковых обкатников с сепараторами, несмотря на то, что она не обеспечивает возможность изменения в небольших пределах наладочного диаметра.

Решение задач, связанных с улучшением качества получаемой поверхности и повышением равномерности обработки различных ее участков, способствовало появлению ряда способов отделочно-упрочняющей обкатки, заключающихся в добавлении дополнительных движений к основным движениям заготовки или инструмента. Дополнительные движения направлены на уменьшение количества числа прокатываний деформирующих элементов при поверхностном пластическом деформировании металла в полюсной зоне и увеличение их на экваториальной части сферы. При этом они в той или иной степени увеличивают время обработки заготовок и снижают производительность.

Установлены основные отличительные признаки способов отделочно-упрочняющего обкатывания неполных сферических поверхностей, которыми являются:

- 1) вид деформирующих элементов (тел качения);
- 2) способ размещения деформирующих элементов в обкатнике;
- 3) возможность регулировки диаметра обкатки;
- 4) наличие и характер дополнительных движений инструмента (обкатника);

5) наличие и характер дополнительных движений заготовки.

На рисунке 2 представлен результат анализа и систематизации способов отделочно-упрочняющего обкатывания с самоустановливающимися на обрабатываемой сфере инструментами, отображающий их развитие.

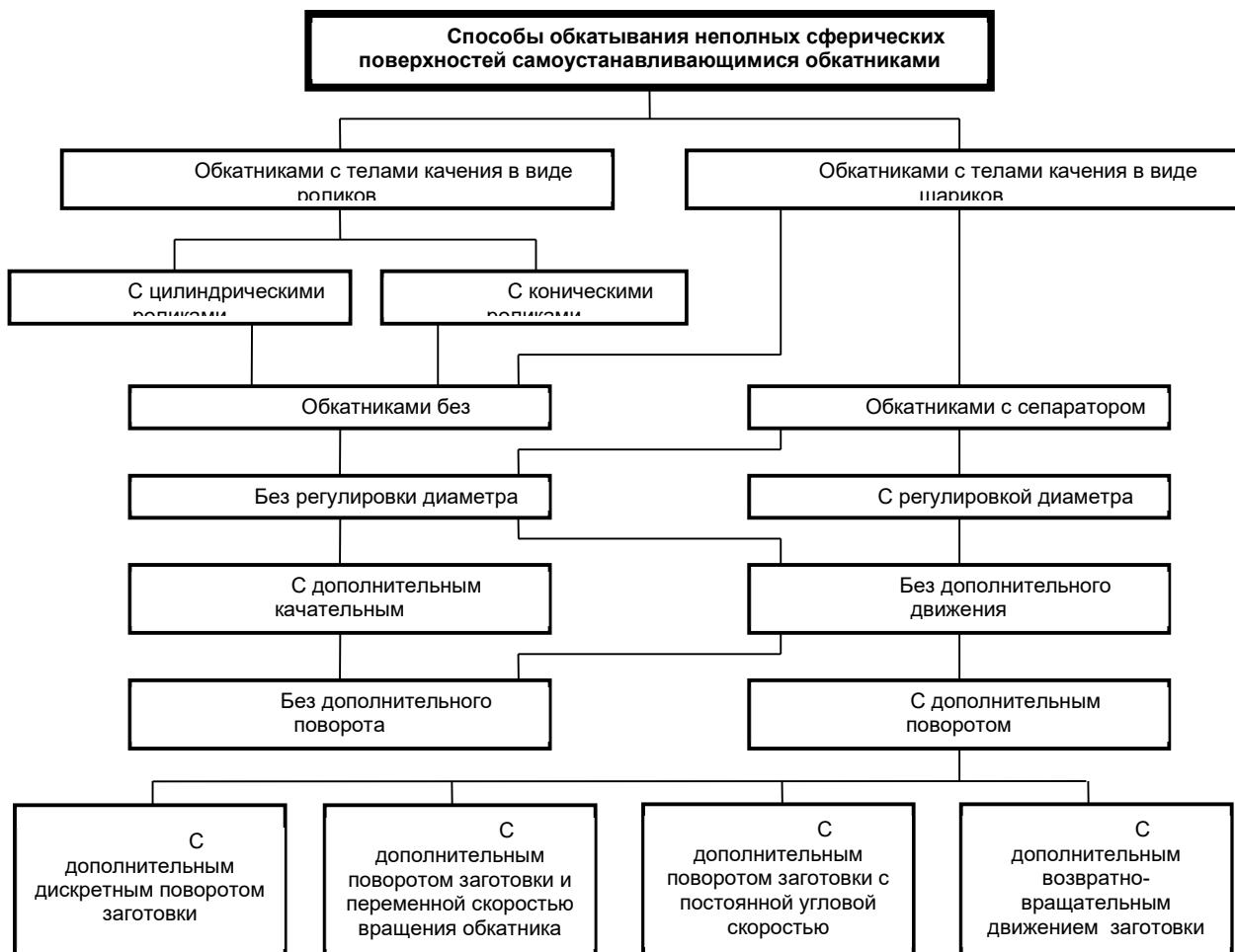


Рисунок 2 - Способы отделочно-упрочняющего обкатывания неполных сферических поверхностей

### Заключение

Таким образом, основываясь на проведенной систематизации способов отделочно-упрочняющего обкатывания неполных сферических поверхностей можно сформулировать следующее:

- 1) развитие способов отделочно-упрочняющего обкатывания неполных сферических поверхностей идет по пути использования различных комбинаций основных и дополнительных движений инструмента и заготовки;
- 2) применение дополнительных движений инструмента и заготовки, как правило, сопряжено с уменьшением производительности процесса обкатки по сравнению со способами, использующими лишь основные движения, а также с усложнением конструкции оборудования;
- 3) для повышения производительности и качества обработки необходимо использовать обкатники с возможно большим числом деформирующих тел;
- 4) следует считать перспективным применение нерегулируемых бессепараторных шариковых обкатников, содержащих максимально возможное число деформирующих элементов, обеспечивающих повышение производительности и качества обработки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алифанов, А.В. Технология и инструмент для упрочнения деталей сферической формы методом обкатки / А.В. Алифанов, А.Г. Анисович [и др.] // Литье и металлургия. – 2006. – № 1(37). – С. 151–153.
2. ГОСТ 18296-72. Обработка поверхностей пластическим деформированием. Термины и определения – Введ. 1974–07–01. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200008731> (ГОСТ)

3. Гун, И.Г Изготовление пальцев шаровых шарниров с использованием комбинированной обработки / И.Г. Гун, О.С. Железков, И.А. Михайловский [и др.] // Прогрессивные технологии в машиностроении: мат. 15 ежегод. междунар науч.-техн. конф. – Одесса, 2000. – С. 67-68.
4. Гун, И.Г. Совершенствование технологии изготовления шаровых пальцев автомобилей / И.Г. Гун, О.С. Железков, И.А. Михайловский [и др.] // Бюл. ин-та «Черметинформация». –2000. – №11-12 (1211-1212). – С. 60-62.
5. Гун, И.Г. Совершенствование технологической системы изготовления шаровых шарниров / И.Г. Гун. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 416 с.
6. Катунин, А.А. Обеспечение точности формы и заданной шероховатости неполных сферических головок шаровых пальцев автомобильных шаровых шарниров / А.А. Катунин, А.В. Катунин, Н.Н. Самойлов, А.М. Сидоров // Известия ОрелГТУ. Серия Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2008. - №2 (545). – С. 56-58.
7. Катунин, А.А. Совершенствование метода обкатки неполных сферических поверхностей / А.А. Катунин // Вестник Рыбинской государственной технологической академии имени П.А. Соловьёва: сборник научных трудов. – 2007. - №1(11)
8. Катунин, А.А. Технологическое обеспечение качества сферических головок шаровых пальцев обкаткой бессепараторным инструментом: дис. канд. тех. наук: 05.02.08 / Катунин Андрей Александрович. – Орел, 2009. – 177 с.
9. Лихобабина, Н.В. Упрочнение поверхностей алмазным выглаживанием / Н.В. Лихобабина, А.А. Королев // Вестник государственного Саратовского технического университета. – 2008. Т.1. – №1 С. 17-24.
10. Михайловский, И.А. Совершенствование процесса поверхностного пластического деформирования головок шаровых пальцев планетарной обкаткой с целью повышения качества изделий: дис. ... канд. тех. наук: 05.16.05 / Михайловский Игорь Александрович. – Магнитогорск, 2001. – 138 с.
11. Нгуен Ван Хинь. Технологические основы отделочно-упрочняющей обработки осциллирующим выглаживанием: дис. канд. тех. наук: 05.02.08 / Нгуен Ван Хинь. – Иркутск, 2019. – 150 с.
12. Пат. 2278018 Российская Федерация, МПК6 В 24 В 39/04. Способ импульсно-ударного деформирования сферической поверхности / Ю.С. Степанов [и др.]; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «ОрелГТУ». - № 2004136435/02; заявл. 2004.12.14; опубл. 2006.06.20, Бюл. №17.
13. Попок, Н.Н. Анализ способов обработки сферических поверхностей деталей / Н.Н. Попок, В.А. Терентьев, Р.С. Хмельницкий [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. – 2006. – № 12. – С. 42–45.
14. Meliyev, H. O. Essence and some features of processing parts by surface plastic deformation / H. O. Meliyev, M. Kobulov // Academic research in educational sciences – 2021. – Vol. 2. – P. 755 –758.

**Катунин Андрей Александрович**

Мценский филиал ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева» к.т.н., доцент кафедры инженерно-технических дисциплин, директор Мценского филиала ОГУ им. И.С. Тургенева  
303031 Орловская область, г. Мценск, ул. Тургенева, 196  
+79155080508  
E-mail: katunin57@yandex.ru

**Трясцин Антон Павлович**

Мценский филиал ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева» к.т.н., доцент кафедры инженерно-технических дисциплин Мценского филиала ОГУ им. И.С. Тургенева  
303031 Орловская область, г. Мценск, ул. Тургенева, 196  
+79803677831  
E-mail: antondocent1968@mail.ru

**Прокошина Татьяна Сергеевна**

Мценский филиал ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева» к.т.н., доцент кафедры инженерно-технических дисциплин Мценского филиала ОГУ им. И.С. Тургенева  
303031 Орловская область, г. Мценск, ул. Тургенева, 196  
+79208220012  
E-mail: proka@rambler.ru

**Махова Светлана Асадовна**

Мценский филиал ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева» ст. преподаватель экономики и информационных технологий Мценского филиала ОГУ им. И.С. Тургенева  
303031 Орловская область, г. Мценск, ул. Тургенева, 196  
+79202846274  
E-mail: sv\_gasanova@mail.ru

---

KATUNIN A.A., TRYASTSIN A.P., PROKOSHINA T.S., MAKHOVA S.A.

**ANALYSIS AND SYSTEMATIZATION OF METHODS FINISHING AND STRENGTHENING TREATMENT**

**Abstract.** The article presents the results of an analysis of existing methods for finishing and hardening rolling of incomplete spherical surfaces, which help ensure high quality, are characterized by high productivity and ease of implementation. The diamond smoothing method is also considered. A group of structurally similar parts is designated for which finishing and strengthening processes can be used. A kinematic diagram is presented that underlies the rolling methods being studied. The types of deforming elements used in the rolling process are considered. The main attention is paid to methods of finishing and hardening rolling with self-aligning (self-centering) tools on the sphere being rolled due to the fact that their use contributes to obtaining a high-quality spherical surface. It has been established that the development of methods for finishing and hardening rolling of incomplete spherical surfaces is aimed at using various

*combinations of basic and additional movements of the tool and workpiece. As a result, a systematization of methods for dimensional-hardening processing of incomplete spherical surfaces is presented.*

**Keywords:** finishing and hardening treatment, rolling, diamond smoothing, incomplete spherical surface, deforming elements, surface quality, systematization.

## BIBLIOGRAPHY

1. Alifanov, A.V. Technology and tools for hardening spherical parts using the rolling method / A.V. Alifanov, A.G. Anisovich [et al.] // Casting and metallurgy. – 2006. – No. 1(37). – pp. 151–153.
2. GOST 18296-72. Treatment by surface plastic deformation. Terms and definitions – Introduction. 1974-07-01. – Access mode: <https://docs.cntd.ru/document/1200008731> (GOST)
3. Gun, I.G. Manufacturing of ball joint pins using combined processing / I.G. Gun, O.S. Zhelezkov, I.A. Mikhailovsky [and others] // Progressive technologies in mechanical engineering: mat. 15 annually. international scientific and technical conf. – Odessa, 2000. – P. 67-68.
4. Gun, I.G. Improving the technology for manufacturing ball pins for cars / I.G. Gun, O.S. Zhelezkov, I.A. Mikhailovsky [and others] // Bull. institute "Chermetinformatsiya". –2000. – No. 11-12 (1211-1212). – P. 60-62.
5. Gun, I.G. Improving the technological system for manufacturing ball joints / I.G. Goon. – M.: Publishing house of MSTU im. N.E. Bauman, 2000. – 416 p.
6. Katunin, A.A. Ensuring the accuracy of the shape and the specified roughness of the incomplete spherical heads of the ball fingers of automobile ball joints / A.A. Katunin, A.V. Katunin, N.N. Samoilov, A.M. Sidorov // News of Orel State Technical University. Series Fundamental and applied problems of engineering and technology. - 2008. - No. 2 (545). – pp. 56-58.
7. Katunin, A.A. Improving the method of rolling incomplete spherical surfaces / A.A. Katunin // Bulletin of the Rybinsk State Technological Academy named after P.A. Solovyov: collection of scientific works. – 2007. - No. 1 (11)
8. Katunin, A.A. Technological assurance of the quality of spherical heads of ball pins by rolling in a cageless tool: dis. Ph.D. those. Sciences: 02/05/08 / Katunin Andrey Aleksandrovich. – Orel, 2009. – 177 p.
9. Likhobabina, N.V. Hardening of surfaces by diamond burnishing / N.V. Likhobabina, A.A. Korolev // Bulletin of the State Saratov Technical University. – 2008. T.1. – No. 1 P. 17-24.
10. Mikhailovsky, I.A. Improving the process of surface plastic deformation of ball pin heads by planetary rolling in order to improve the quality of products:: dis....cand. those. Sciences: 05.16.05 / Mikhailovsky Igor Aleksandrovich. – Magnitogorsk, 2001. – 138 p.
11. Nguyen Van Hinh. Technological foundations of finishing and strengthening treatment by oscillating smoothing: dissertation. Ph.D. those. Sciences: 02/05/08 / Nguyen Van Hin. – Irkutsk, 2019. – 150 p.
12. Pat. 2278018 Russian Federation, MPK6 B 24 B 39/04. Method of pulse-shock deformation of a spherical surface / Yu.S. Stepanov [and others]; applicant and patent holder State Educational Institution of Higher Professional Education "Orel State Technical University". - No. 2004136435/02; application 2004.12.14; publ. 2006.06.20, Bull. No. 17.
13. Popok, N.N. Analysis of methods for processing spherical surfaces of parts / N.N. Popok, V.A. Terentyev, R.S. Khmelnitsky [and others] // Bulletin of Polotsk State University. Series V. – 2006. – No. 12. – P. 42–45.
14. Meliyev, H. O. Essence and some features of processing parts by surface plastic deformation / H. O. Meliyev, M. Kobulov // Academic research in educational sciences – 2021. – Vol. 2. – R. 755–758.

### Katunin Andrey Alexandrovich

Mtsensk branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Oryol State University named after I.S. Turgenev», Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Engineering and Technical Disciplines, Director of the Mtsensk branch of the I.S. Turgenev OSU 303031 Oryol region, Mtsensk, st. Turgeneva, 196 +79155080508  
E-mail: katunin57@yandex.ru

### Tryastsin Anton Pavlovich

Mtsensk branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Oryol State University named after I.S. Turgenev», Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Engineering and Technical Disciplines, Director of the Mtsensk branch of the I.S. Turgenev OSU 303031 Oryol region, Mtsensk, st. Turgeneva, 196 +79803677831  
E-mail: antondocent1968@mail.ru

### Prokoshina Tatyana Sergeevna

Mtsensk branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Oryol State University named after I.S. Turgenev», Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Engineering and Technical Disciplines, Director of the Mtsensk branch of the I.S. Turgenev OSU 303031 Oryol region, Mtsensk, st. Turgeneva, 196 +79208220012  
E-mail: proka@rambler.ru

### Makhova Svetlana Asadovna

Mtsensk branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Oryol State University named after I.S. Turgenev» senior lecturer in Economics and Information Technology at the I.S. Turgenev Mtsensk branch of the OSU 303031 Oryol region, Mtsensk, st. Turgeneva, 196 +79202846274  
E-mail: sv\_gasanova@mail.ru

КУДРЯВЦЕВ С.В.

## УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ РАЗВЕРТЫВАНИЯ ЗА СЧЕТ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

**Аннотация.** В работе описан разработанный оригинальный автоматизированный лабораторный комплекс для управления процессом развертывания за счет измерения и контроля температуры в зоне резания в режиме реального времени, позволяющий поддерживать постоянную температуру в зоне резания в режиме реального времени. Представлена разработанная методика управления процессом развертывания с целью получения функциональных алгоритмов режимов обработки при поддержании постоянной оптимальной температуры в зоне резания, обеспечивающей снижение интенсивности износа инструмента, в том числе при применении эпиламных покрытий и смазочно-охлаждающих технологических средств.

**Ключевые слова:** развертывание, развертка, низкоскоростные процессы механической обработки, лабораторный комплекс, измерение температуры, температура резания, управление процессом, стойкость инструмента, методика управления.

### Введение

Развёртка – сравнительно дорогостоящий инструмент. Стоимость машинных видов развёрток в розничной торговле в России по состоянию на июль 2024 года составляет около 2000 рублей [1].

Сравнительно высокая стоимость развёртки – инструмента, который позволяет получать точные отверстия и низкую шероховатость обработанной поверхности предполагает повышение эффективности процесса обработки отверстий развертыванием, в том числе за счет повышения периода стойкости инструмента.

Повышение износстойкости развёртки возможно за счет применения нанопокрытий эпилама на режущую часть инструмента, что позволяет повысить период стойкости режущего инструмента от 2 до 5 раз при одновременном снижении шероховатости обработанных поверхностей и повышении скорости резания (производительности) [2].

В тоже время данные нанопокрытия имеют такой недостаток как предельная температура эксплуатации (до 450 °C), что ограничивает их применение при повышенных режимах обработки. Поэтому применение нанопокрытий эпилама наибольшим образом подходит для низкоскоростной чистовой обработки отверстий развертыванием, в том числе за счет повышения качества обработки отверстий [2].

Работа с оптимальными и постоянными значениями температуры резания позволяет дополнительно снизить интенсивность износа режущего инструмента при сохранении режимов обработки на заданных значениях [3].

Для получения зависимостей режимов обработки от времени обработки, обеспечивающих снижение интенсивности износа инструмента и повышение времени эксплуатации инструмента с нанопокрытием эпилама необходимо измерение и контроль температуры в зоне резания, а также возможность управления процессом развертывания.

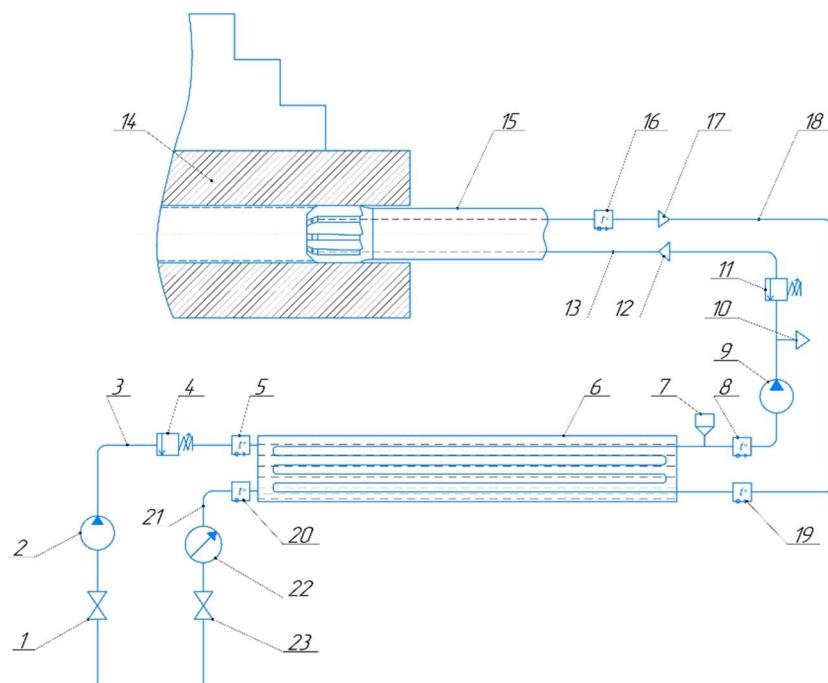
Измерение температуры резания сравнительно традиционным методом с помощью естественной термопары не позволяет получать значения температуры резания в абсолютных величинах в связи с необходимостью проведения очень трудоемкой операции градирования термопары «инструмент-обрабатываемый материал» [4].

В связи с этим разработан оригинальный автоматизированный лабораторный комплекс, позволяющий в рамках лабораторных исследований управлять процессом развертывания за счет контроля и измерения температуры в зоне резания в режиме реального времени [5,6].

### Основная часть

Лабораторный комплекс может поддерживать постоянную температуру в зоне резания за счет контроля температуры в зоне резания и изменения режимов обработки (в основном скорости резания), что позволяет рекомендовать эффективные условия обработки, а также снизить интенсивность износа инструмента.

Схема метода измерения температуры низкоскоростного процесса развертывания представлена рисунке 2 [6].



**Рисунок 1 – Схема установки для определения относительных изменений температуры при процессе развертывания:**

1 – водопроводный кран; 2 – насос холодного контура; 3 – подводящая трубка холодного контура; 4 – предохранительный клапан холодного контура; 5 – датчик температуры входной холодного контура; 6 – теплообменник; 7 – заливная горловина; 8 – датчик выходной горячего контура; 9 – насос горячего контура; 10 – воздухоотводчик; 11 – предохранительный клапан горячего контура; 12 – сужение трубы; 13 – подводящая часть трубы горячего контура; 14 – обрабатываемая заготовка; 15 – развёртка; 16 – датчик, измеряющий температуру после развёртки; 17 – сужение трубы; 18 – отводящая часть трубы горячего контура; 19 – датчик температуры горячего контура; 20 – датчик температуры выходной холодного контура; 21 – отводящая трубка холодного контура; 22 – расходомер; 23 – регулирующий вентиль (задвижка)

В системе горячего контура высокотемпературный теплоноситель закачивается к развёртке насосом 9 через сужение 12, подводящую часть трубы 13, которая проходит вдоль предварительно обработанного паза для отвода стружки развёртки 15, т. е. через её рабочую часть, температура теплоносителя измеряется датчиком 16 сразу после развёртки, что должно позволить получать значения температуры в зоне резания наиболее близко отражающие реальную температуру резания, далее теплоноситель проходит через расширение 17 и поступает обратно через отводящую часть трубы 18, датчик температуры 19 в теплообменник 6 (рисунок 1).

Для предупреждения превышения давления в горячем контуре выше допустимого на трубке после насоса 9 установлен предохранительный клапан 11, настроенный на давление 8 бар. Для удаления воздуха при заправке контура теплоносителем служит воздухоотводчик 10. Контур заправляется высокотемпературным теплоносителем через заливную трубку 7 (рисунок 1).

Для измерения температуры в зоне резания при обработке отверстий развёрткой установлена хромель-копелевая термопара (датчик 16) на отводящей части трубы сразу после развёртки. Для определения скорости резания установлен датчик скорости вращения шпинделя станка, который подключен к блоку аналогово-цифровых преобразователей.

Для измерения температуры теплоносителя и воды на входе и выходе из теплообменника в установке используются хромель-копелевые термопары ТП-1, ТП-2, ТП-3, ТП-4. Термопары подключаются к автоматическому электронному потенциометру. Лабораторная установка посредством кабеля и АЦП соединяется с ПК и через виртуальную модель производится «считывание» необходимых параметров [7].

Основным датчиком 16, измеряющим температуру в зоне резания при обработке отверстий развёрткой, является хромель-копелевая термопара на отводящей части трубы в непосредственной близости к развёртке. Значения датчика отображаются на экране

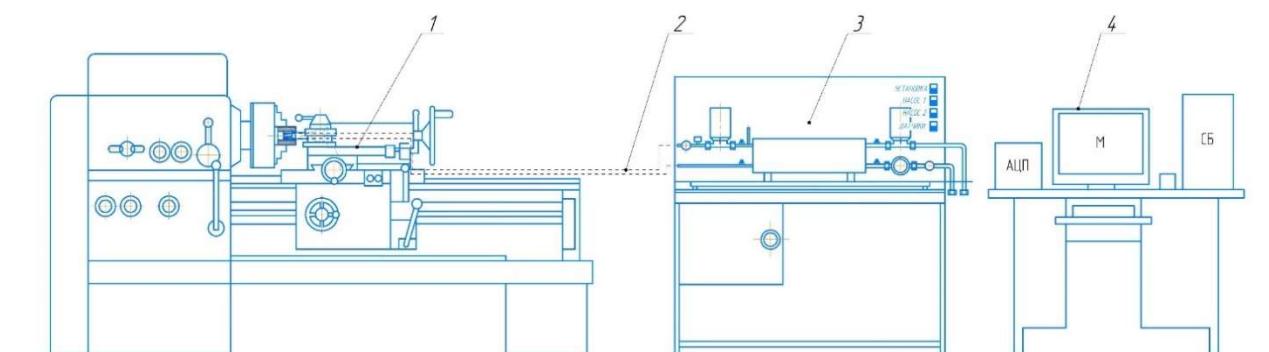
компьютера в режиме реального времени и являются основным значением, на котором базируется исследование.

Датчик 19 является вторым основным датчиком, отображающим температуру теплоносителя после рабочей части развертки с погрешностью из-за гидравлических и тепловых потерь, а также служит для измерения температуры на входе в теплообменник.

Вследствие определения разницы значений температуры датчиков 8 и 19 определяется значение температуры охлаждения теплоносителя в теплообменнике. Разница значений датчиков 5 и 20 показывает нагрев воды в теплообменнике.

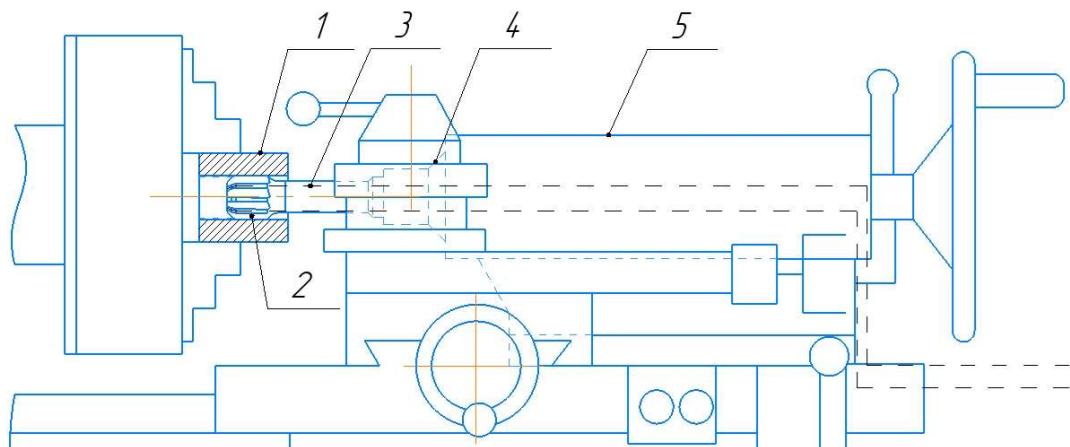
С повышением температуры воды в холодном контуре необходимо увеличивать расход воды. При достижении температуры 95 °C на датчике 20 установку необходимо выключить для остывания воды в холодном контуре.

Результаты измерения температуры теплоносителя после развертки, на выходе и выходе из теплообменника и скорости вращения шпинделя станка с обработкой данных производятся в программной среде LabView [7].



**Рисунок 2 – Автоматизированный лабораторный комплекс для определения относительных изменений температуры и управления процессом развертывания соединенный с токарным станком 16К20:**

1 – токарный станок 16К20; 2 – трубка горячего контура, проходящая непосредственно через рабочую часть развертки; 3 – установка для определения относительных изменений температуры процесса развертывания; 4 – установка для контроля и управления процессом развертывания



**Рисунок 3 – Закрепление развертки и трубы с высокотемпературным теплоносителем на токарном станке 16К20:**

1 – обрабатываемая заготовка; 2 – развертка; 3 – трубка горячего контура с высокотемпературным теплоносителем; 4 – пиноль; 5 – задняя бабка

Подводящая часть трубы горячего контура диаметром 10 мм соединяется со шлангом, подключенным к предохранительному клапану 11, и подводится к развёртке, закреплённой на токарном станке 16K20, где непосредственно перед соединением с развёрткой имеет сужение с 10 до 3 мм и далее проходит через предварительно обработанный верхний паз, направляющий конус, предварительно обработанный нижний паз рабочей части развёртки.

Далее температура в зоне резания измеряется датчиком 16 (рисунок 1), считывающим температуру теплоносителя после развертки.

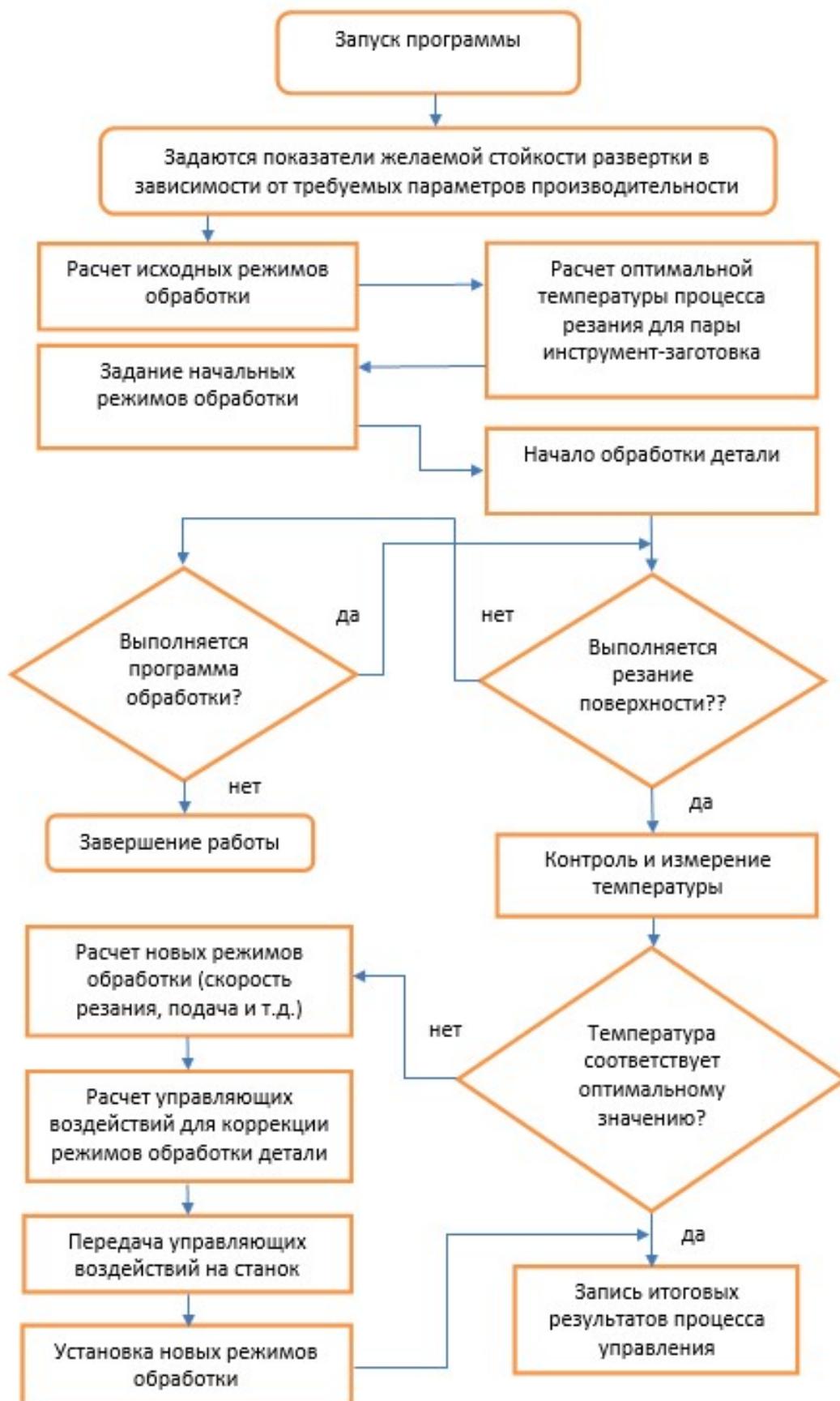


Рисунок 4 – Блок-схема методики управления процессом развертывания

Развёртка закрепляется в пиноле 4 задней бабки 5 (рисунок 3) с плавающим патроном на токарном станке к которому от установки подведена медная трубка 3 с высокотемпературным теплоносителем проходящая через предварительно ошлифованные пазы рабочей и калибрующей части развертки 2. Выбор токарного станка обусловлен необходимостью закрепления развёртки и трубы горячего контура с высокотемпературным теплоносителем в статичном состоянии.

Поступательное движение развертки предполагает нежесткое соединение трубы 2 (рисунок 2) с высокотемпературным теплоносителем отходящей от установки для измерения относительных изменений температуры 3 (рисунок 2) и закрепленной на задней бабке токарного станка 5 (рисунок 4). Это предполагает замену шлангов на установке [7] на высокотемпературные шланги в связи с повышенной температурой теплоносителя, в том числе для гашения вибрационных и иных воздействий на установку.

Диаметр трубопровода для подвода теплоносителя к развёртке ограничивается 3 мм, что связано с особенностью прохождения трубы горячего контура в пазах развёртки. Для предотвращения контакта трубы с поверхностью обрабатываемого отверстия необходимо, чтобы высота режущей кромки развёртки  $h$  составляла не менее 4,25 мм, в связи с максимально допустимой величиной износа по задней поверхности  $h_3$  у быстрорежущих развёрток, работающих по стали, которая составляет 0,8 мм [8].

При увеличении времени обработки температура в зоне резания повышается вследствие износа инструмента по задней поверхности, который главным образом определяет износ такого точного инструмента как развёртка. Потеря точности отверстия является основным критерием износа развёртки.

В связи с этим необходимо управление скоростью резания для снижения температуры в зоне резания в зависимости от времени обработки и контроля температуры в зоне резания в режиме реального времени.

Управление процессом развертывания за счет изменения значений скорости резания в зависимости от увеличения износа развёртки и температуры резания с целью поддержания постоянной температуры в зоне резания предполагает получение зависимостей (функциональных алгоритмов) скорости резания от времени обработки.

Для обеспечения снижения интенсивности износа и повышения эффективности обработки, а также получения более качественных обработанных поверхностей отверстий разработана методика управления процессом развертывания за счет контроля и измерения относительных изменений температуры в зоне резания на основе методики, предложенной в работе [4].

Блок-схема методики управления представлена на рисунке 4.

После проверки достоверности результатов обработки экспериментальных данных возможно сформировать функциональные алгоритмы режимов обработки при процессе развертывания, обеспечивающие высокие значения стойкости инструмента и наиболее эффективные режимы обработки, в том числе при совместном применении эпиламных покрытий и смазочно-охлаждающих технологических средств в зависимости от времени обработки.

### **Заключение**

Управление процессом развертывания возможно осуществлять за счет контроля температуры в зоне резания в режиме реального времени, что позволяет изменять режимы обработки (в основном скорость резания) для работы с постоянным значением температуры, обеспечивающим снижение интенсивности износа инструмента, в том числе при применении нанопокрытий эпилам и смазочно-охлаждающих технологических средств.

Полученные функциональные алгоритмы режимов обработки процесса развертывания возможно использовать в производственных условиях, в том числе на станках с автоматическим регулированием, которое наибольшим образом подходит для чистовых процессов обработки по причине придания деталям высокого качества поверхностного слоя.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Развёртки ручные цилиндрические 15 мм // Сайт Всeinstrumenty.ru – URL: <https://www.vseinstrumenti.ru/search/?what=развертки%2015%20мм>
2. Эпиламы или фтор-поверхностно активные вещества (ПАВы) // Сайт FTORPOLYMER.RU: [сайт]. – 2009. – URL: [https://www.ftorpolymer.ru/docs/kondratov\\_r\\_yu\\_doklad\\_po\\_epilamam\\_i\\_protessu\\_epilamirovaniy.pdf](https://www.ftorpolymer.ru/docs/kondratov_r_yu_doklad_po_epilamam_i_protessu_epilamirovaniy.pdf)

3. Силин, С. С. Метод подобия при резании материалов / С. С. Силин. – М.: Машиностроение, 1979. – 152 с.
4. Методы измерения температур в зоне резания [Электронный ресурс]: режим доступа: <https://studfile.net/preview/2657146/page:11/>.
5. Кудрявцев, С. В. Определение относительных изменений температуры параметров процесса развертывания при применении нанопокрытий на режущую часть инструмента / С. В. Кудрявцев, А. С. Тарапанов, М. Ф. Селеменев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологий. – 2019. – № 6 (338). – С. 53-58.
6. Кудрявцев, С. В. Определение температуры процесса развертывания в режиме реального времени / С. В. Кудрявцев, А. С. Тарапанов, Д. О. Золкин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологий. – 2020. – № 2 (340). – С. 68-73.
7. Патент РФ № 2017111455 14.06.2016. Устройство стендового автоматизированного лабораторного комплекса для изучения процессов теплообмена // Патент России №2668415. 2018. / Бодров В.К., Ванин В.С., Кудрявцев С.В. [и др.].
8. Технологические свойства новых СОЖ для обработки резания / М. И. Клужин, В. М. Тихонов, Д. И. Симкин [и др.] – М.: Машиностроение, 1979. – 192 с.

**Кудрявцев Сергей Васильевич**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл соискатель учёной степени кандидата технических наук  
302030, г. Орёл, ул. Московская д. 34  
E-mail: [sla1der123@yandex.ru](mailto:sla1der123@yandex.ru)

---

KUDRYAVTSEV S.V.

## CONTROL OF THE REAMING PROCESS ACCOUNT OF CONTROL OF TEMPERATURE IN THE CUTTING ZONE IN REAL TIME MODE

**Abstract.** The article describes an original automated laboratory complex developed to control the reaming process by measuring and controlling the temperature in the cutting zone in real time, allowing you to maintain a constant temperature in the cutting zone in real time. The developed method of controlling the deployment process is presented in order to obtain functional algorithms for processing modes while maintaining a constant optimal temperature in the cutting zone, which reduces the intensity of tool wear, including when using epilam coatings and lubricating and cooling technological means.

**Keywords:** reaming, reamer, low-speed machining processes, laboratory complex, temperature measurement, cutting temperature, process control, tool life, control technique.

## BIBLIOGRAPHY

1. Manual cylindrical 15 mm reamers // All Tools website.<url> – URL: <https://www.vseinstrumenti.ru/search/?what=sweep%2015%20mm>
2. Epilams or fluorine-surfactants (surfactants) // FTORPOLYMER website.EN: [website]. – 2009. – URL: [https://www.ftorpolymer.ru/docs/kondratov\\_r\\_yu\\_doklad\\_po\\_epilamam\\_i\\_protsessu\\_epilamirovaniy.pdf](https://www.ftorpolymer.ru/docs/kondratov_r_yu_doklad_po_epilamam_i_protsessu_epilamirovaniy.pdf)
3. Silin, S. S. The method of similarity in cutting materials / S. S. Silin. – M.: Mashinostroenie, 1979. – 152 p.
4. Methods of measuring temperatures in the cutting zone [Electronic resource]: access mode: <https://studfile.net/preview/2657146/page:11>
5. Kudryavtsev, S. V. Determination of relative temperature changes in the parameters of the deployment process when applying nanocoating to the cutting part of the tool / S. V. Kudryavtsev, A. S. Tarapanov, M. F. Selemenev // Fundamental and applied problems of engineering and technology. – 2019. – № 6 (338). – Pp. 53-58.
6. Kudryavtsev, S. V. Determination of the temperature of the deployment process in real time / S. V. Kudryavtsev, A. S. Tarapanov, D. O. Zolkin // Fundamental and applied problems of engineering and technology. – 2020. – № 2 (340). – Pp. 68-73.
7. Patent of the Russian Federation No. 2017111455 06/14/2016. The device of a bench-mounted automated laboratory complex for studying heat transfer processes // Patent of Russia No.2668415. 2018. / Bodrov V.K., Vanin V.S., Kudryavtsev S.V. [et al.].
8. Technological properties of new coolant for cutting processing / M. I. Klushin, V. M. Tikhonov, D. I. Simkin [et al.] – M.: Mechanical Engineering, 1979. – 192 p.

**Kudryavtsev Sergey Vasiliyevich**

Orel State University,  
Candidate of scientific degree of Candidate of Technical Sciences  
302030, Orel. Moskovskaya str., 34  
E-mail: [sla1der123@yandex.ru](mailto:sla1der123@yandex.ru)

© Кудрявцев С.В., 2024

ГОЛЕНКОВ В.А., РАДЧЕНКО С.Ю., ДОРОХОВ Д.О.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВАКУУМНОГО СТАРЕНИЯ ТОНКИХ ЛЕНТ ИЗ БЕРИЛЛИНОЙ БРОНЗЫ

**Аннотация.** Рассмотрена технология получения тонких бериллиевых лент и их финальной обработки - вакуумного старения. Проанализированы механические параметры полученных после дисперсионного твердения (старения) лент из сплава БрБ2. Даны рекомендации по выбору рациональных режимов термообработки для сохранения пластичности.

**Ключевые слова:** обработка металлов давлением, берилловые бронзы, старение, вакуум, глубина выдавливания по Эриксену, твердость.

### Введение.

В приборостроительной промышленности, особенно в области контактных пар, остро стоит вопрос о применяемых материалах. Они должны обладать сочетанием механических свойств с высокой электропроводностью, а также быть стойким к циклическим нагрузкам большой интенсивности и обладать достаточной теплопроводностью. Параллельно стоит задача уменьшения габаритов и массы приборов, поэтому совокупность указанных требований определяет использование для контактных пар тонких лент бериллиевых бронз. Наибольшее распространение получили двойные бронзы БрБ2, в основной состав которых входит никель и кобальт, а также дополнительно легированные титаном сплавы типа БрБНТ1,9. Изготовление тонких лент и конечных изделий из данных материалов имеет ряд особенностей, основная из которых заключается в возможности дисперсионного твердения (старения). Технологический процесс обработки давлением двойных медно-бериллиевых бронз интересно рассмотреть с использованием подходов, описанных в [1, 2], в особенности для тонких лент, а наиболее важным является изучение истории деформирования во взаимосвязи с конечной операцией – старением [3, 4].

### Постановка задачи.

Обработка давлением (прокатка) бериллиевых бронз как в горячем [5], так и в холодном состоянии хорошо исследованный процесс, физический механизм старения отлично изучен [3, 4]. После оптимального деформирования в 30-40% и закалки от температур 750-780°C, структура рассматриваемых материалов представляет собой пересыщенный α-твёрдый раствор [3, 4]. Из данного состояния бериллиевые бронзы удовлетворительно деформируются до 50-60% холодной прокаткой. Альтернативно, из закалённого состояния, при определённых температурах и выдержках, возможен распад пересыщенного α-твёрдого раствора: атомы бериллия располагаются в определённых плоскостях, образуя промежуточные γ"- и γ-фазы, параллельные плоскостям (100) α [3, 4]. С течением времени промежуточные фазы переходят в стабильную γ-фазу на основе интерметаллида CuBe, что и обеспечивает механизм старения.

Режимы старения в [3, 4] рекомендуют выдержку при 320-340°C в течение 2-5 ч. В [5] более подробно определено, что старение при температуре 320°C обеспечивает максимальную прочность для всех исходных состояний ( $\sigma_b = 1301-1421$  Мпа); указано, что при  $t = 400^\circ\text{C}$  можно достичь  $\sigma_b = 1156-1284$  Мпа, а для  $t = 240^\circ\text{C}$  для достижения  $\sigma_b = 1176$  МПа требуемое время выдержки составляет  $\tau = 4$  ч. Описанные температурные и временные интервалы говорят о необходимости выработки более конкретных значений для каждой истории деформирования и конечного назначения проката или готового изделия. Последнее еще более актуально для тонких лент, так как возможно возникновение проблематики, описанной в [5] – «склеивание» витков в рулоне готового проката. Необходимо избегать возникновения цветов побежалости, так как продукт (лента или штамповка из ленты) – это фактически конечное изделие и составная часть готового прибора, травление таких изделий проблематично и экономически нецелесообразно.

Решением проблемы является старение бериллиевых бронз в вакууме. Данный процесс дорогостоящий, поэтому выбор рациональных температурных и временных параметров является актуальным для производителей плоского проката и приборостроительной промышленности. Кроме того, достигая возможных максимальных значений по таким показателям, как временное сопротивление и твердость, важно выдерживать технологические характеристики пластичности – глубину выдавливания по Эриксену. Поэтому задача по

исследованию вакуумного старения тонких лент из бериллиевых бронз – важная технологическая задача в обработке металлов давлением и термической обработке как составной части процесса.

**Технология.**

В условиях ООО «Мценскпрокат» для бронз марок БрБ2 применяют шихту из чистых металлов – 100% или чистые металлы от 50% до 75% и от 25% до 50% отходов в виде промежуточного переплава – шихтовой плиты (сплавление отходов прокатного производства и стружки). Слитки отливают в охлаждаемые кристаллизаторы с параметрами литья, указанными в таблице.

Таблица 1 - Технологические параметры отливки слитков сплава БрБ2.

Размер кристаллизатора	Температура литья, °C	Скорость литья, м/час	Давление воды, атм
80 (40) x 260-280	1080-1100	4,5-5,5	1,0-1,3

Процесс горячей прокатки, аналогичный описанному в [6, 7] с толщины 70(35) мм, на стане «Дуо-Кварт» фирмы «Skoda». Далее процесс во многом аналогичен [7], за исключением термических операций. В конечном итоге получают ленты различных толщин с требованиями по механическим свойствам по ГОСТ 1789-2013 (см. таблицу 2).

Таблица 2 - Требования ГОСТ 1789-2013 к механическим свойства лент из сплава БрБ2.

Состояние согласно ГОСТ 1789-2013	Толщина, мм	Временное сопротивление разрыву, σ <sub>в</sub> , МПа	Относительное удлинение, % не менее	Твердость по Виккерсу, HV	Глубина выдавливания, мм не менее
мягкое	менее 0,15	-	-	<130	8
мягкое	0,15-0,25	390-590	20	<130	8
мягкое	более 0,25	390-590	30	<120	-
твердое	менее 0,15	-	-	>170	3
твердое	0,15-0,25	590-880	-	>170	3
твердое	более 0,25	640-930	2,5	>170	-

При этом мягкое состояние достигается закалкой, а твёрдое деформированием после термообработки на 30-40% (по расчёту относительных деформаций при сжатии). Так же технология производства должна обеспечивать способность продукции к дисперсионному твердению с показателями, приведенными в таблице 3.

Таблица 3 - Требования ГОСТ 1789-2013 к механическим свойства лент из сплава БрБ2 после дисперсионного твердения (старения).

Состояние согласно ГОСТ 1789-2013	Толщина, мм	Временное сопротивление разрыву, σ <sub>в</sub> , МПа	Относительное удлинение, % не менее	Твердость по Виккерсу, HV, не менее
мягкое	менее 0,15	-	-	330
мягкое	0,15-0,25	1080-1470	-	330
мягкое	более 0,25	1130-1470	2,0	330
твердое	менее 0,15	-	-	360
твердое	0,15-0,25	1030-1570	-	360
твердое	более 0,25	1170-1570	1,5	360

В качестве объекта выбраны ленты толщиной 0,3 (образец №1), 0,4 (образец №3), которые используем в качестве сравнительных образцов в твёрдом состоянии. Для проведения экспериментальных работ использованы ленты толщиной 0,15мм (образцы №2, 4 и 5) разных плавок в мягким состоянии. Химический состав образцов приведён в таблице 4, начальные механические свойства показаны в таблице 5. Наибольший интерес представляют параметры, которые отражают условия применения бериллиевых бронз – твердость (см. рисунок 1) и испытание на выдавливание по Эриксену (см. рисунок 2).



*Рисунок 1 - Микротвердометр ПМТ-3М*



*Рисунок 2 - Машина для испытания на глубину выдавливания фирмы Erichsen*



*Рисунок 3 - Электропечь сопротивления камерная вакуумная Vega-1М с образцами ленты БрБ2 для старения*

*Таблица 4 - Химический состав исследуемых образцов, %*

№ п/п,	Толщина, мм	Fe	Si	Ni+Co	Al	Cu	Pb	Be	Zn
1	0,3	0,15	0,10	0,27	0,08	97,3	0,005	1,82	0,22
2	0,15	0,15	0,08	0,21	0,07	97,5	0,005	1,80	0,09
3	0,4	0,15	0,11	0,25	0,07	97,4	0,005	1,80	0,12
4	0,15	0,15	0,11	0,22	0,08	97,4	0,005	1,87	0,10
5	0,15	0,15	0,11	0,22	0,07	97,3	0,005	1,90	0,09
Требования ГОСТ 18175-78	не более 0,15	не более 0,15	0,2-0,5	не более 0,15	ост.	не более 0,005	1,8- 2,1	не нормируется, входит в общую сумму примесей в 0,5	

Старение рассматриваемых лент толщиной 0,15мм и образцов для сравнения проводили в печи Вега 1М (см. рис 3) при  $t = 315^{\circ}\text{C}$  и времени  $\tau = 5\text{ч}$ . Выбор температуры обусловлен рекомендацией ГОСТ 1789-2013, Приложение Б. Важным аспектом является понижение температуры по сравнению с [3-5] для сохранения технологической пластичности материала. Время выдержки выбрано максимальное, чтобы обеспечить гарантированный

переход всего объема материала в стабильную  $\gamma$ -фазу [3-5]. Выбор максимального времени при этом слабо отражается на себестоимости процесса (по крайней мере, в условиях ООО «Мценскпрокат»): цикл обработки зависит от охлаждения всех узлов печи, а остывание материала происходит вместе с печью. Полученные таким образом ленты являются конечным продуктом, из которого вырубкой, вытяжкой или резкой получают изделие, используемое далее в качестве элемента прибора. Приведённой обработкой также подвергают уже готовые изделия на предприятиях потребителях.

Таблица 5 - Механические свойства исследуемых лент перед старением.

№ п/п	Состояние согласно ГОСТ 1789-2013	Толщина, мм	Временное сопротивление разрыву, $\sigma_b$ , МПа	Относительное удлинение, %	Твердость, HV	Глубина выдавливания, мм
1	мягкое	0,3	464,33	36,36	121,9	-
2	твердое	0,15	718,36	2,70	238,3	4,2
3	мягкое	0,4	470,76	50,34	125,9	-
4	твердое	0,15	764,50	2,47	249,2	4,15
5	твердое	0,15	775,38	2,40	255,5	4,15

### Исследование.

Исследовались показатели твердости и глубина выдавливания лент (пример - см. рис 4) после дисперсионного твердения по режиму  $t = 315^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 5$  ч в печи при степени вакуума  $1 \times 10^{-4}$  мм рт. ст. (см. таблицу 6).

Таблица 6 - Механические свойства исследуемых лент после старения.

Толщина, мм	Твердость по Виккерсу, состаренные ленты, HV	Изменение твердости, %	Отклонение от требований ГОСТа, %	Глубина выдавливания, состаренные ленты, мм	Изменение глубины выдавливания, %
0,3	295,9	142,7	10,3	4,75	-
0,15	314,4	31,9	12,7	3,75	-10,7
0,4	279,6	122,1	15,3	5,3	-
0,15	297,9	19,5	17,3	4,1	-1,2
0,15	287,6	12,6	20,1	3,7	-10,8

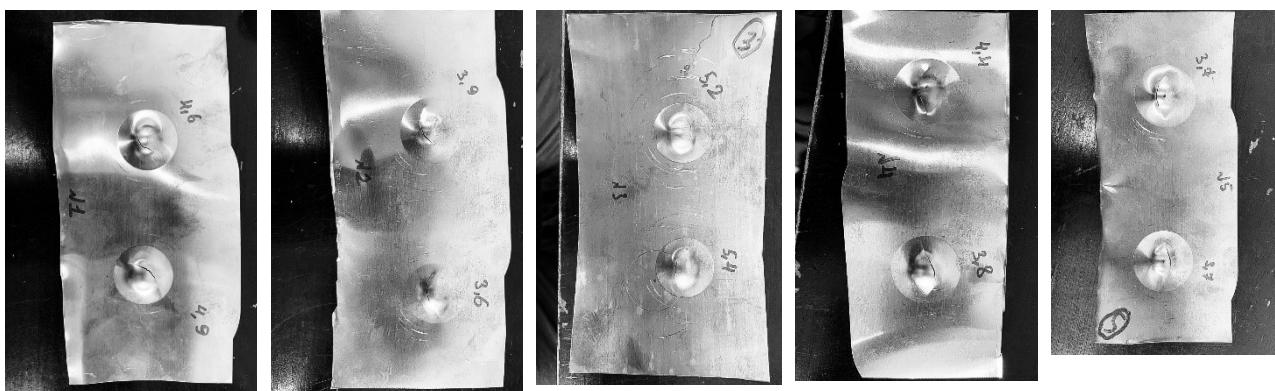


Рисунок 4 - Образцы БрБ2 после испытания на выдавливание по Эриксену

По приведенным данным видно, что выбранный режим дисперсионного твердения для мягких лент (образцов-свидетелей с толщинами 0,3 и 0,4мм) не является оптимальным, так как требуемый уровень твердости не достигнут, при этом сам ее рост значителен. Так же отмечено, что технологическая пластичность в показателях глубины вытяжки, которая для данных типоразмеров не регламентируется ГОСТом, соответствует показателям для твердого состояния для размеров менее 0,25мм (см. таблицу 3). Таким образом, предлагаемый режим дисперсионного твердения для мягких лент бериллиевой бронзы марки БрБ2 обеспечивает

значительный, но недостаточный прирост твердости при сохранении пластичности, что в дальнейшем и определит область применения предлагаемого режима.

Подробнее остановимся на рассмотрении полученных свойств для тонких лент толщиной 0,15мм. Данные ленты имеют одинаковую историю деформирования и термообработки, но (как видно из данных таблицы 4) существенно различаются по полученным значениям механических свойств. Определяющую роль в объяснении полученных данных играет содержание бериллия в сплаве (см. таблицу 7). До старения твердость растет с ростом содержания основного легирующего элемента в меди, после наблюдается обратная зависимость. Технологическая пластичности от содержания бериллия не зависит.

Таблица 7 - Влияние содержания Ве на твердость лент до и после старения.

Содержание бериллия, %	Твердость по Виккерсу, до старения HV	Твердость по Виккерсу, состаренные ленты, HV
1,80	238,3	314,4
1,87	249,2	297,9
1,90	255,5	287,6

Показатели по твердости тонких лент при рассматриваемой термообработке, как и для мягких лент, не соответствуют требованиям ГОСТ, но вытяжка по Эриксену максимально падает примерно на 10%, что говорит о сохранении пластичности. В целом полученные сочетания микротвердости и глубины вытяжки состаренных образов бериллиевой бронзы позволяют обеспечить оптимальное использование в конечном изделии, произведя над ними необходимые операции листовой штамповки. Увеличение температуры [3-5] позволит повысить твердость, но существенно скажется на технологичности. Таким образом, предлагаемый режим  $t = 315^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 5$  ч, при степени вакуума  $1 \times 10^{-4}$  мм рт. ст., может быть рекомендован в качестве базового для финальной обработки изделий и лент, но при этом требуется более детальное исследование взаимосвязи получаемых механических свойств при рассматриваемом режиме дисперсионного твердения с химическим составом лент и предшествующей истории деформирования. Так же необходимо проанализировать структуру получаемых рассматриваемой обработкой тонких лент на макро- и микроуровнях. Наибольший интерес представляется в зависимости между содержанием бериллия и конечным результатом по твердости при рассматриваемых режимах, так как чем ниже его содержание в сплаве, тем более экономически и экологически целесообразно производить рассматриваемые ленты. В целом, по результатам проведенного исследования может быть поставлена задача по установлению функциональной зависимости между содержанием бериллия в материале и его финальными свойствами после дисперсионного твердения при режимах:  $t = 315^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 5$  ч и степени вакуума  $1 \times 10^{-4}$  мм рт. ст.

### **Заключение.**

В работе рассмотрена технология получения тонких бериллиевых лент и их дисперсионного твердения (старения). Получены данные по твердости и глубины выдавливания по Эриксену для лент, подвергнутых старению при режиме:  $t = 315^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 5$  ч и степени вакуума  $1 \times 10^{-4}$  мм рт. ст. Поставлены задачи для дальнейшего исследования.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Теория и технология валковой штамповки: моногр. / В. А. Голенков, С. Ю. Радченко, Д. О. Дорохов. - М.: Оружие и технологии, 2019. - 396 с.: ил.
2. Научные основы упрочнения комплексным локальным деформированием [Текст] / В.А. Голенков, С.Ю. Радченко, Д.О. Дорохов, Г.П. Короткий. – М.: ООО «Издательство Машиностроение», Орел: Госуниверситет-УНПК, 2013. – 122 с.
- 3.Пастухова Ж. П. Пружинные сплавы цветных металлов / Ж. П. Пастухова, А. Г. Раухтадт. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва: Металлургия, 1984. - 363 с.
4. Осинцев, О.Е. Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки [Текст]: справочник/ О.Е. Осинцев, В.Н. Федоров. – М.: Машиностроение, 2004. - 336 с.
5. Зисельман В. Л. Исследование и усовершенствование технологии производства лент из бериллиевой бронзы, обеспечивающей улучшение качества проката: диссертация кандидата технических наук: 05.16.05. - Москва, 2006. - 118 с.: ил.

6. Горячая прокатка слитков, имеющих форму призмы с основанием в виде равнобедренной трапеции, как процесс с комплексным локальным нагружением очага деформации [Текст] / Голенков В.А., Радченко С.Ю., Д.О. Дорохов // «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева, № 6(356). — 2022г. – С 149-156.

7. Влияние истории деформирования и режимов термической обработки на механические свойства никелевых лент толщиной 0,05мм [Текст] / Голенков В.А., Радченко С.Ю., Д.О. Дорохов // «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева, № 6(350). — 2021г. – С 54-62.

**Радченко Сергей Юрьевич**  
ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С.  
Тургенева», г. Орел  
Доктор технических наук,  
профессор, проректор по  
научно-технологической  
деятельности и аттестации  
научных кадров  
302020, г. Орел, Наугорское  
шоссе, 29  
Тел. +7(4862)47–50–71  
E-mail: radsu@rambler.ru

**Голенков Вячеслав Александрович**  
ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С.  
Тургенева», г. Орел  
Доктор технических наук,  
профессор,  
руководитель научной школы  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел. +7(4862)43–26–06  
E-mail: president@ostu.ru

**Дорохов Даниил Олегович**  
ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С.  
Тургенева», г. Орел  
Доктор технических наук,  
доцент, профессор кафедры  
машиностроения  
302020, г. Орел, Наугорское  
шоссе, 29  
Тел. +79102084402  
E-mail: ddostu@mail.ru

GOLENKOV V.A., RADCHENKO S.Y., DOROHOV D.O.

## STUDY OF VACUUM AGING OF THIN BERYLLIUM BRONZE STRIPS

**Abstract.** The technology of obtaining thin beryllium tapes and their final processing - vacuum aging is considered. The mechanical parameters of the obtained samples after dispersion hardening (aging) of the BrB2 alloy tapes are analyzed. Recommendations are given for choosing rational heat treatment modes to maintain plasticity.

**Keywords:** metal forming, beryllium bronzes, aging, vacuum, Eriksen extrusion depth, hardness.

## BIBLIOGRAPHY

1. Theory and technology of roll stamping: monograph / V. A. Golenkov, S. Y. Radchenko, D. O. Dorokhov. - M.: Weapons and technologies, 2019. - 396 p.: ill.
2. Scientific foundations of hardening by complex local deformation [Text] / V.A. Golenkov, S.Y. Radchenko, D.O. Dorokhov, G.P. Korotkiy. – M.: LLC "Publishing House of Mechanical Engineering", Orel: Gosuniversitet-UNPK, 2013. – 122 p.
3. Pastukhova Zh. P. Spring alloys of non-ferrous metals / Zh. P. Pastukhova, A. G. Rakhshtadt. - 2nd ed., revised. and add. - Moscow: Metallurgy, 1984. - 363 p.
4. Osintsev, O.E. Copper and copper alloys. Domestic and foreign brands [Text]: reference / O.E. Osintsev, V.N. Fedorov. - Moscow: Mashinostroenie, 2004. - 336 p.
5. Ziselman V. L. Research and improvement of the production technology of beryllium bronze tapes, ensuring improved quality of rolled products: dissertation of candidate of technical sciences: 05.16.05. - Moscow, 2006. - 118 p.: ill.
6. Hot rolling of ingots having the shape of a prism with a base in the form of an isosceles trapezoid as a process with complex local loading of the deformation site [Text] / Golenkov V.A., Radchenko S.Yu., D.O. Dorokhov // "Fundamental and applied problems of engineering and technology". – The eagle: I.S. Turgenev OSU, No. 6(350). -- 2021 – From 54-62.
7. The influence of the history of deformation and heat treatment modes on the mechanical properties of nickel tapes with a thickness of 0.05mm [Text] / Golenkov V.A., Radchenko S.Yu., D.O. Dorokhov // "Fundamental and applied problems of engineering and technology". – The eagle: I.S. Turgenev OSU, No. 6(350). -- 2021 – From 54-62.

**Radchenko Sergey Yuryevich**  
«Орел State University named after  
I.S. Turgenev», Orel  
Ph.D., professor, vice-rector for  
scientific and technological activities  
and certification of scientific  
personnel  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
Ph.: +7(4862)47–50–71  
E-mail: radsu@rambler.ru

**Golenkov Vyacheslav Aleksandrovich**  
«Орел State University named after I.S.  
Turgenev», Orel  
Ph.D., professor, head of scientific  
school  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
Ph.: +7(4862)43–26–06  
E-mail: president@ostu.ru

**Dorokhov Daniil Olegovich**  
«Орел State University named  
after I.S. Turgenev», Orel  
Ph.D., assistant professor,  
professor, department of  
mechanical engineering  
302020, Orel, Naugorskoe  
Shosse, 29  
Ph.: +79102084402  
E-mail: ddostu@mail.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ЧАСТИЦ МЕДНОГО ШЛАКА ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ОБРАБОТКЕ ДЛЯ ГИДРОАБРАЗИВНОГО РЕЗАНИЯ

**Аннотация.** Исследован процесс кристаллизации частиц медного шлака при высокотемпературной обработке, что связано с получением из шлаковых отходов медного производства продукции технического назначения - нового типа абразивного материала для технологии гидроабразивного резания. Представлены результаты калориметрических измерений для зерен медного шлака, определены пики и стадии кристаллизации. Проведен анализ изменения веса, размера и формы частиц образцов медного шлака. По результатам рентгеновской дифрактометрии определены кристаллические структуры в термически обработанных частицах медного шлака.

**Ключевые слова:** гидроабразивное резание, абразив, термическая обработка, медный шлак, кристаллическое строение

### 1. Введение

В России, в шлаковых отвалах накоплено более 800 млн. т. шлаков цветной металлургии. Объем использования шлаков менее 5 процентов. Использование медного шлака в производственных технологиях механической обработки ограничивается из-за невысокой твердости. Однако, его применение для технологии гидроабразивной резки, позволит заменить импортный гранатовый песок из Индии, Австралии, Китая и обеспечить технологическую безопасность России [1, 2].

Основываясь на проведенном анализе методов повышения прочности различных материалов, сделан вывод, что необходимо применить технологию термического упрочнения частицы медного шлака. [3].

Известно, что твердость и прочность абразивного зерна можно повысить термической обработкой частиц. Так в работе [4] приведены результаты сравнительные испытания режущей способности гранатового абразива Bartons 80 HPX (США), и австралийского граната, подлежащего термической обработке. Термически обработанный абразив показал улучшение режущей способности (~3 % при резке нержавеющей стали). Известны исследования по упрочнению гранатовых абразивов методами термической обработки [5], в которых выявлено, что термическая обработка может способствовать улучшению режущей способности гранатовых абразивов. Термически обработанный гранат при  $t \leq 800^{\circ}\text{C}$  в течение 1 ч имеет более высокую прочность (примерно на 60 %) по сравнению с исходным необработанным гранатом. Автор связывает это с окислением металла до более высокой степени, находящимся в ядре кристалла граната.

Медный шлак, охлажденный на воздухе, имеет темный цвет и аморфное состояние. Плотность варьируется 2800 – 3800 кг/м<sup>3</sup>. Прочность аморфных веществ, значительно ниже прочности кристаллических, поэтому для получения материалов повышенной прочности специально проводят кристаллизацию. Поскольку аморфное состояние является термодинамически метастабильным, при достаточно высоких температурах может происходить перестройка структуры в кристаллическую (кристаллизация вещества). Переход в равновесное кристаллическое состояние приводит к существенному изменению всех свойств материала. Именно поэтому изучению кинетики кристаллизации аморфных материалов посвящено большое количество работ [6 - 8], и к настоящему времени общие закономерности процесса кристаллизации в основном установлены.

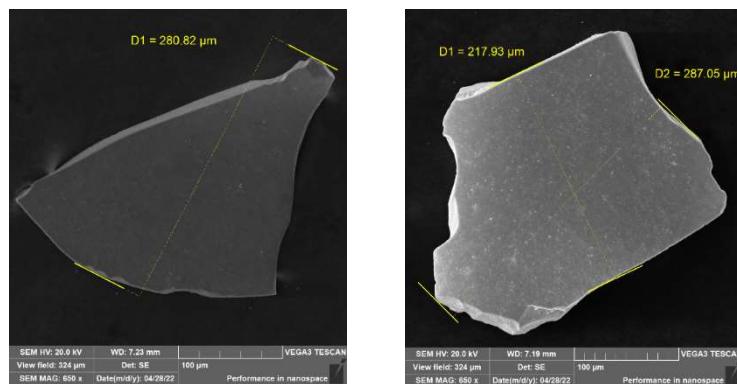
Анализ протекающих диффузионных процессов в поверхностном слое неметаллов из внешней активной среды показал, что правильность выбора параметров термической обработки медного шлака зависит от четкости представления о процессах, протекающих в реакционной зоне. Термодиффузионные процессы в твердых веществах всегда связаны с активацией, так как атому или иону необходимо преодолеть энергетический барьер для

осуществления миграции. Энергия иона может повышаться в результате роста температуры [9].

Известные исследования термической обработки медного шлака направлены в основном на восстановление металлов из медного шлака при температуре плавления [10]. Условия повышения прочности зерен медного шлака в результате перехода из аморфного состояния в кристаллическое при нагреве не изучены.

## 2. Методология экспериментальных исследований

В качестве исходного материала для экспериментальных исследований использовался медный шлак производства ООО «Уралгрит» г. Екатеринбург, произведенный по ТУ 23.99.19-007-82101794-2020 с размером зерен 0,1 - 0,6 мм (рисунок 1). Исходный материал просеивался через сита лабораторные с полотном из нержавеющей сетки с размерами ячеек 0,14 и 0,355 мм.



*Рисунок 1 - Зерна медного шлака  
(изображения со сканирующего электронного микроскопа Tescan VEGA 3)*

Калориметрические измерения проводились на дифференциальном сканирующем калориметре DSC PT1600 до температуры 1000°C на разных скоростях нагрева.

Термическая обработка медного шлака и испытания режущей способности образцов осуществлялась на базе АО «Научно-производственное предприятие «Калужский приборостроительный завод «Тайфун», г. Калуга. Для термической обработки использовалась электропечь камерная CHO-4.8.4/13М пр-ва ЗАО «Миус», Россия.

Термическая обработка проводилась при следующих режимах: скорость нагрева – 20°C/мин; температура нагрева – 850°C, 900°C, 950°C; время выдержки – 1 час; охлаждение – воздух.

Анализ размера и формы частиц образцов выполнен на базе ФГБОУ МГТУ им. Баумана (национальный исследовательский университет) (г. Москва) с помощью лазерного дифракционного анализатора Microtrac S3500. Для разбивки возможных агломератов частиц, которые могли образоваться в результате хранения, слеживания или слипания после смешивания с жидкостью, в которой проводится измерение, перед исследованием образцы подвергали ультразвуковой обработке источником 40 Вт в течение 60 секунд.

Рентгеноструктурное изучение распределения химических элементов проведено с помощью рентгеновского дифрактометра ARL XTRA. В процессе рентгеноструктурного изучения распределения химических элементов с помощью рентгеновского дифрактометра ARL XTRA регистрировались интенсивности рентгеновского излучения, отраженного кристаллическими решетками соединений в соответствии с величиной дифракционного угла 2θ. Угловой диапазон съемки по 2θ составлял от 1 до 80°, шаг сканирования 0,02°. Общий минеральный состав определялся на порошковой пробе образца, которая готовилась путем растирания средней пробы. Идентификация соединений выполнялась сравнением полученного массива рефлексов с эталонными дифрактограммами индивидуальных соединений (содержащихся в международной базе дифракционных стандартов ICDD PDF-2 Release 2014) с использованием программного пакета WinXRD-2/05. Количественное

определение соединений в образцах и уточнение параметров минералов проводилось по методу Ритвельда путем моделирования экспериментальной дифрактограммы с наилучшим приближением «теория-эксперимент». Количественный рентгеноструктурный анализ по методу Ритвельда предполагает полный анализ полученной дифрактограммы с учетом всех кристаллических особенностей минералов. Исключается необходимость добавления стандартного вещества к исследуемому образцу, что позволяет вне зависимости от типа породы определять ее полный минеральный состав.

### **3. Результаты и обсуждение**

Поскольку зерна медного шлака находятся в неравновесном состоянии, при нагревании, как только атомы их компонентов приобретают достаточную подвижность, в них происходят превращения, связанные с переходом в более устойчивое состояние. Критерием стабильности медного шлака является температура, при которой становится заметным изменение каких-либо свойств.

При нагреве аморфная фаза медного шлака постепенно переходит в состояние, отвечающее внутреннему равновесию. Этот переход совершается в результате протекания ряда релаксационных процессов: выхода избыточного свободного объема, релаксации внутренних напряжений.

Кристаллизация медного шлака сопровождается не просто переходом из аморфной фазы в кристаллическую того же состава, а имеют место химические реакции с образованием различных фаз, как стабильных, так и метастабильных, зачастую сложного химического состава. Заканчивается кристаллизация образованием равновесных фаз.

Поскольку система при этом переходит в термодинамическое состояние более близкое к равновесию, избыточная теплота будет выделяться. Другой тепловой эффект будет наблюдаться при нагреве медного шлака, связанный с процессом кристаллизации, в результате которого метастабильная аморфная фаза через ряд стадий переходит в кристаллическое состояние.

Калориметрические измерения показали, что для зерен медного шлака кристаллизация протекает в две стадии. Первая стадия кристаллизации началась при температуре 762,6°C (1035,75K), вторая стадия кристаллизации при температуре 795,1°C (1068,25 K). Первый пик кристаллизации был при температуре 766,3°C (1039,45 K), второй пик – 800,7°C (1073,85 K).

Перестроение атомов в начале кристаллизации приводит к изменению химического состояния медного шлака ближнего порядка, атомы группируются вокруг соединения кремния (Si), но структура пока аморфная. Затем наступает стадия MS-I – образование в медном шлаке первичной кристаллической метастабильной фазы в аморфной фазе путем гомогенного зарождения и роста, сопровождаемое выделением тепла, при этом сохраняется некоторое количество аморфной фазы. Фаза MS-I будет представлять собой мелкие кристаллы, из менее тугоплавких соединений Al, Cu, Ca. Затем такая смешанная структура полностью переходит в кристаллическую метастабильную фазу MS-II, которая и превращается при высокой температуре в стабильную равновесную фазу, которая может иметь сверхструктуру. Вторичная фаза зарождается в остаточной аморфной фазе и растет очень быстро, в результате чего аморфная фаза полностью исчезает. В медном шлаке образуется однородное состояние, но сложная структура.

Результаты анализа размера и формы частиц образцов медного шлака после термообработки образцов показали, что термическая обработка способствовала дроблению зерен медного шлака (рисунок 2): количество крупных частиц (от 210 мкм) уменьшилось в 2 раза, количество частиц с размерами до 176 мкм возросло. Количество зерен с размерами в интервале от 176 до 210 мкм осталось практически неизменным (9,81 % и 9,87 % соответственно).

Мелкие частицы имеют маленькую кинетическую энергию, поэтому способствуют худшему прорезанию материала. Поэтому для дальнейшего улучшения режущей способности термически обработанного медного шлака его необходимо дополнительно просеивать.

Микрофотографии поверхности зерен медного шлака свидетельствуют, о структурных изменениях, происходящих при термической обработке зерен. Поверхность частиц медного

шлака, не прошедшего термическую обработку, не отличается высокой степенью разрыхления. Степень разрыхления поверхности увеличивается с увеличением температуры термической обработки шлака при  $t = 800^{\circ}\text{C}$  и  $950^{\circ}\text{C}$ . С характерно присутствие каплевидных структур, количество и размер которых увеличивается при повышении температуры до  $1000^{\circ}\text{C}$ . Данные структуры разделяются на более мелкие частицы или разрушаются.

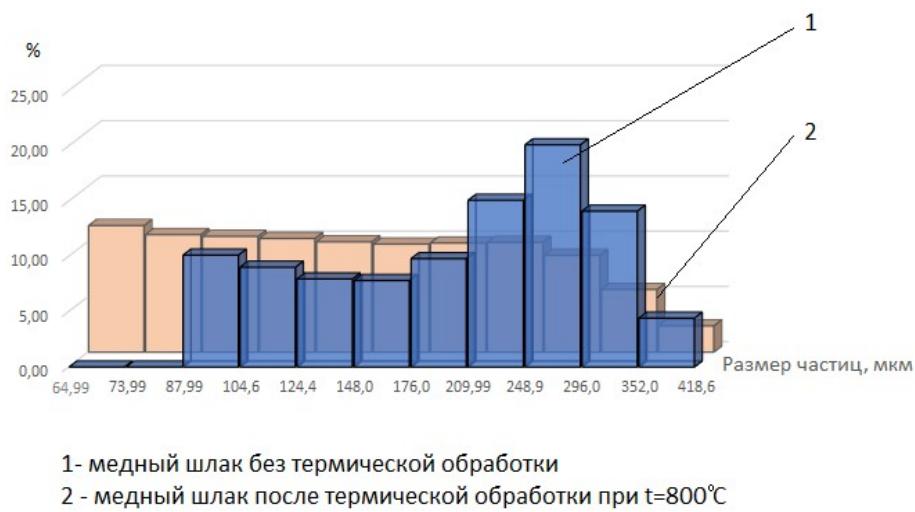


Рисунок 2 - Сравнение численных распределений частиц в образцах медного шлака

Мощность диффузионного источника определена по значениям объемной адсорбции молекул углерода в поверхность частиц медного шлака. Для исследования эффективной мощности диффузионного источника выбран наиболее удобный метод регистрации диффузии – метод регистрации изменения веса. Для регистрации изменения веса образцов использовались прецизионные весы для взвешивания веществ и материалов в лабораторных условиях OHAUS Adventurer (рисунок 3). Как видно из значений веса образцов (рисунок 3) изменение массы образцов зависит от температуры обработки. В общем случае прирост массы является характеристикой перестройкой кристаллической решетки медного шлака. Из анализа данных можно сделать вывод, что при температуре обработки  $850^{\circ}\text{C}$  происходит интенсивное образование структурных комплексов. При  $950^{\circ}\text{C}$  прирост массы наибольший, так как происходит перестройка сердцевины частицы.

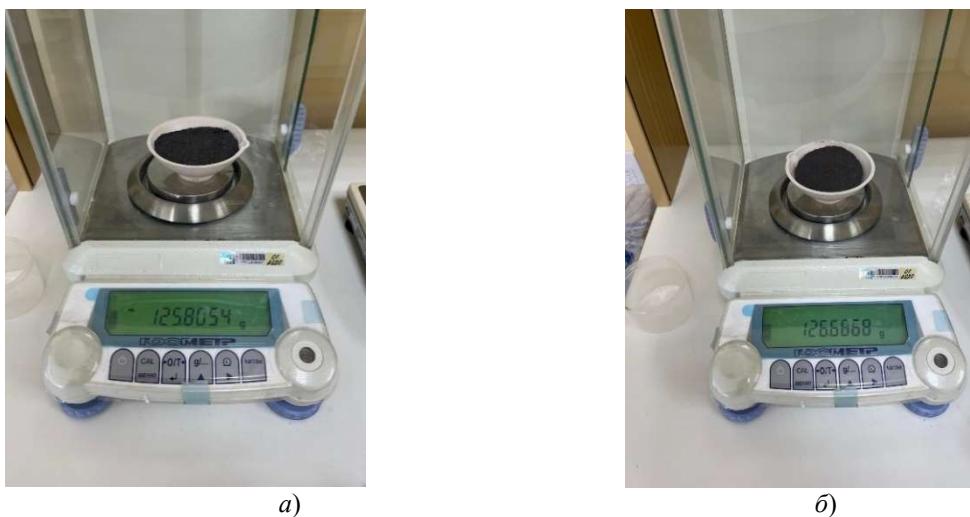
Рентгеновская дифрактометрия нетермообработанного образца медного шлака не показала наличия явно выраженных рефлексов, соответствующих присутствию хорошо окристаллизованных фаз, поэтому исследуемый образец либо находится в аморфном состоянии, либо кристаллические компоненты, присутствующие в образце, имеют слишком малый для регистрации размер. Преимущественно аморфное (стекловидное) состояние характерно для оксидно-силикатных систем, подвергнутых быстрому охлаждению от высоких температур. Такая структура согласуется с условиями получения медного шлака путем охлаждения горячей массы водой или сжатым воздухом.

Термическая обработка при выбранных условиях способствовала росту кристаллитов в образцах. Кристаллическая структура термически обработанного шлака преимущественно представлена соединениями  $\text{AL}_2\text{SiO}_5$  – 40-55% и  $\text{Mg}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$  – 28 - 35%. Также в составе присутствуют  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -9 – 12 % и  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$  – 8 - 10%.

Установлено, что кристаллическая структура термически обработанного шлака преимущественно представлена соединениями  $\text{AL}_2\text{SiO}_5$  – 40-55% и  $\text{Mg}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$  – 28 - 35%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -9 – 12 %,  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$  – 8 - 10%,  $\text{SiC}$  – 1 - 5%, которые образуются в поверхностном слое полиоксидной округлой частицы при изотермической выдержке.

Вещество состава  $\text{AL}_2\text{SiO}_5$  имеет три полиморфные модификации: дистен (кианит), андалузит и силлиманин. Образование той или иной модификации зависит от температуры, при которых протекает процесс. Известно, что при температурах выше  $675^{\circ}\text{C}$  и нормальном давлении образуется силлиманин. В структуре силлиманиита алюминиево-кислородные

группы образуют цепочки, состоящие из октаэдрических групп, образованных шестью атомами кислорода, окружающими атом алюминия; каждый октаэдр связан общими ребрами с двумя соседними аналогичными октаэдрами.



**Рисунок 3 - Регистрация изменения веса образцов в лабораторных условиях на весах OHAUS Adventurer:**  
а – температура обработки  $850^{\circ}\text{C}$ , б – температура обработки  $950^{\circ}\text{C}$

$\text{Mg}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$  (пироп) – магнезиальный алюмосиликат из группы гранатов.  $\text{SiO}_4$ -тетраэдры и  $\text{AlO}_6$ -октаэдры формируют смешанный каркас таким образом, что параллельно осям третьего порядка образуются цепочки изолированных друг от друга  $\text{AlO}_6$ -октаэдров.

Гематит  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  является устойчивой модификацией окисла  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и имеет ромбоэдрическую кристаллическую решетку типа корунда. Данная модификация может быть получена переходом магнетита  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  при  $t=767$ град. С, что согласуется с установленными режимами химико-термической обработки медного шлака. В структуре корунда присутствуют пары гранносвязанных октаэдров, из которых формируются зигзагообразные цепочки.

Структура кристаллата  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$  представляет собой кубическую плотноупакованную решетку ионов кислорода. Более мелкие катионы  $\text{Fe}^{3+}$  располагаются в октаэдрических пустотах, а более крупные катионы  $\text{Zn}^{2+}$  – в тетраэдрических пустотах (заполнены 1/8 тетраэдрических и 1/2 октаэдрических пустот).

Полиморфизм  $\text{SiC}$  характеризуется большим количеством схожих кристаллических структур, называемых политипами. Они являются вариациями одного и того же химического соединения, которые идентичны в двух измерениях, но отличаются в третьем. Таким образом, их можно рассматривать как слои, сложенные в стопку в определённой последовательности. Бета-модификация ( $\beta\text{-SiC}$ ), с кристаллической структурой типа цинковой обманки (аналог структуры алмаза), образуется при температурах ниже 1700 град. С.

### Заключение

При нагреве аморфная фаза медного шлака постепенно переходит в состояние, отвечающее внутреннему равновесию. Этот переход совершается в результате протекания ряда релаксационных процессов: выхода избыточного свободного объема, релаксации внутренних напряжений. Термическая обработка при выбранных условиях способствовала росту кристаллитов в образцах. Кристаллическая структура термически обработанного шлака преимущественно представлена соединениями  $\text{AL}_2\text{SiO}_5$  – 40-55% и  $\text{Mg}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$  – 28 - 35%. Также в составе присутствуют  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -9 – 12 % и  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$  – 8 - 10%.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барсуков Г.В., Галиновский А.Л., Журавлева Т.А., Кожус О.Г. Разработка схемы и методики получения карбидов кремния в поверхностном слое частицы медного шлака для гидроабразивного резания // Все материалы. Энциклопедический справочник. - 2023. - № 12. - С. 25-33.

2. Барсуков Г.В., Тарапанов А.С., Журавлева Т.А., Кожус О.Г., Прасолов Е.А., Петрухин А.В. Разработка технологии и технологических принципов повышения прочности частиц медного шлака для гидроабразивного резания // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2023. - № 6 (362). - С. 61-68.
3. Mattausch Alexander, Bockstedte Michel, Pankratov Oleg Self Diffusion in SiC: the Role of Intrinsic Point Defects. Materials Science Forum. 353-356. 323-326. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.353-356.323.
4. Sitek, L., Martinec, P. Abrasives and possibilities of increase in efficiency of abrasive waterjets. MM Science Journal. 2016, pp. 877-881.
5. Rabah M. A. Influence of Particle Size and Calcination Temperature on the Abrasiveness of Garnet for Water Jet Cutting of Tough Materials. Solid State Phenomena. – Trans Tech Publications Ltd, 2018. Vol 277, pp. 17-26.
6. Zhang, W., Tao, P., Chen, Y. et al. Study on isothermal crystallization kinetics of Zr55,7Cu22,4Ni7,2Al14,7. Sci Rep 12, 5060 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08848-z>
7. Lelito, J. Crystallization Kinetics Analysis of the Amorphous Mg72Zn24Ca4 Alloy at the Isothermal Annealing Temperature of 507 K. Materials 2020, 13, 2815. <https://doi.org/10.3390/ma13122815>
8. Cheng, Sixue, McKenna, Gregory B. Isothermal Crystallization and Time-Temperature Transformation of Amorphous Nifedipine: A Case of Polymorphism Formation and Conversion. Mol. Pharmaceutics 2021, 18, 7, 2786-2802.
9. Kostyk Kateryna, Hatala Michal (2021). Simulation of Diffusion Processes in Chemical and Thermal Processing of Machine Parts. Processes. 9. 698. 10.3390/pr9040698; Pelleg, J. (2016). Diffusion in Alumina Single Crystals. In: Diffusion in Ceramics. Solid Mechanics and Its Applications, vol 221. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-18437-1\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-18437-1_11)
10. Sarfo, P.; Wyss, G.; Ma, G.; Das, A. Carbothermal Reduction of Copper Smelter Slag for Recycling into Pig Iron and Glass. Miner. Eng. 2017, 107, 8-19.

**Барсуков Геннадий Валерьевич**

Орловский государственный университет  
имени И.С. Тургенева,  
доктор технических наук,  
профессор кафедры машиностроения  
г. Орёл ул. Московская д. 34  
Тел: +79038806976  
awj@list.ru

**Кожус Ольга Геннадьевна**

Орловский государственный университет  
имени И.С. Тургенева,  
кандидат технических наук,  
ведущий инженер отдела организационного  
сопровождения НИР  
г. Орёл ул. Наугорское ш. 29  
Тел: +79038806976  
okozhus@mail.ru

**Журавлева Татьяна Александровна**

Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана  
Кандидат технических наук  
г. Калуга, ул. Баженова, д. 2.  
Тел.: + 7 (4862) 413295  
E-mail: awj@list.ru

**Просолов Егор Александрович**

Орловский государственный университет  
имени И.С. Тургенева,  
аспирант кафедры машиностроения  
г. Орёл ул. Московская д. 34  
Тел: +79038806976  
awj@list.ru

**Черепенько Аркадий Анатольевич**

Орловский государственный университет  
имени И.С. Тургенева,  
доктор технических наук,  
доцент кафедры машиностроения  
г. Орёл ул. Московская д. 34  
Тел: +79038806976  
arkan@nxt.ru

---

BARSUKOV G.V., ZHURAVLEVA T.A., KOZHUS O.G., CHEREPENKO A.A., PRASOLOV E.A.

**STUDY OF THE CRYSTALLIZATION PROCESS OF COPPER SLAG  
PARTICLES DURING HIGH-TEMPERATURE TREATMENT FOR  
ABRASIVE WATERJET CUTTING**

**Abstract.** The process of crystallization of copper slag particles during high-temperature treatment was studied, which is associated with the production of technical products from slag waste of copper production - a new type of abrasive material for abrasive waterjet cutting technology. The results of calorimetric measurements for copper slag grains are presented, crystallization peaks and stages are determined. An analysis of changes in the weight, size and shape of copper slag particles is carried out. Based on the results of X-ray diffractometry, crystalline structures in heat-treated copper slag particles are determined.

**Keywords:** waterjet cutting, abrasive, heat treatment, copper slag, crystalline structure

## BIBLIOGRAPHY

1. Barsukov G.V., Galinovsky A.L., Zhuravleva T.A., Kozhus O.G. Development of a scheme and methodology for obtaining silicon carbides in the surface layer of a copper slag particle for waterjet cutting // All materials. Encyclopedic reference book. - 2023. - No. 12. - P. 25-33.
2. Barsukov G.V., Tarapanov A.S., Zhuravleva T.A., Kozhus O.G., Prasolov E.A., Petrukhin A.V. Development of technology and technological principles for increasing the strength of copper slag particles for waterjet cutting // Fundamental and applied problems of engineering and technology. - 2023. - No. 6 (362). - P. 61-68.
3. Mattausch Alexander, Bockstedte Michel, Pankratov Oleg Self Diffusion in SiC: the Role of Intrinsic Point Defects. Materials Science Forum. 353-356. 323-326. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.353-356.323.
4. Sitek, L., Martinec, P. Abrasives and possibilities of increase in efficiency of abrasive waterjets. MM Science Journal. 2016, pp. 877-881.
5. Rabah M. A. Influence of Particle Size and Calcination Temperature on the Abrasiveness of Garnet for Water Jet Cutting of Tough Materials. Solid State Phenomena. – Trans Tech Publications Ltd, 2018. Vol 277, pp. 17-26.
6. Zhang, W., Tao, P., Chen, Y. et al. Study on isothermal crystallization kinetics of Zr<sub>55</sub>,7Cu<sub>22</sub>,4Ni<sub>7</sub>,2Al<sub>14</sub>,7. Sci Rep 12, 5060 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08848-z>
7. Lelito, J. Crystallization Kinetics Analysis of the Amorphous Mg<sub>72</sub>Zn<sub>24</sub>Ca<sub>4</sub> Alloy at the Isothermal Annealing Temperature of 507 K. Materials 2020, 13, 2815. <https://doi.org/10.3390/ma13122815>
8. Cheng, Sixue, McKenna, Gregory B. Isothermal Crystallization and Time-Temperature Transformation of Amorphous Nifedipine: A Case of Polymorphism Formation and Conversion. Mol. Pharmaceutics 2021, 18, 7, 2786-2802.
9. Kostyk Kateryna, Hatala Michal (2021). Simulation of Diffusion Processes in Chemical and Thermal Processing of Machine Parts. Processes. 9. 698. 10.3390/pr9040698; Pelleg, J. (2016). Diffusion in Alumina Single Crystals. In: Diffusion in Ceramics. Solid Mechanics and Its Applications, vol 221. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-18437-1\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-18437-1_11)
10. Sarfo, P.; Wyss, G.; Ma, G.; Das, A. Carbothermal Reduction of Copper Smelter Slag for Recycling into Pig Iron and Glass. Miner. Eng. 2017, 107, 8-19.

**Barsukov Gennady Valeryevich**

Oryol State University  
named after I.S. Turgenev,  
Doctor of Technical Sciences,  
Professor of the Department of Mechanical Engineering  
Orel, Moskovskaya str., 34  
+79038806976  
awj@list.ru

**Kozhus Olga Gennadievna**

Oryol State University  
named after I.S. Turgenev,  
Candidate of Technical Sciences,  
Leading Engineer of the Department of Organizational  
Support of Research  
Orel, Naugorskoe sh. 29  
+79038806976  
okozhus@mail.ru

**Cherepenko Arkady Anatolyevich**

Oryol State University  
named after I.S. Turgenev,  
Doctor of Technical Sciences,  
docent of the Department of Mechanical Engineering  
Orel, Moskovskaya str., 34  
+79038806976  
arkan@nxt.ru

**Zhuravleva Tatiana Alexandrovna**

Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical  
University  
Candidate of Technical Sciences,  
Kaluga, Bazhenova str., 2.  
+ 7 (4862) 413295  
E-mail: awj@list.ru

**Prasolov Egor Alexandrovich**

Oryol State University  
named after I.S. Turgenev,  
postgraduate student of the Department of Mechanical  
Engineering  
Orel, Moskovskaya str., 34  
+79038806976  
awj@list.ru

КАПЫРИН К.И.

## ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРОБЛЕМЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ: ТЕХНОЛОГИИ ОБЪЁМНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ (по материалам периодики)

**Аннотация.** Обзор посвящён вопросам практического применения технологии интенсивной пластической деформации (ИПД) в серийном производстве. Рассмотрены способы с объёмным характером деформирования, представляющие наибольший практический интерес и способные уже сейчас стать частью соответствующих технологических цепочек, связанные с этим проблемы и подходы к их решению. Выполнен сравнительный анализ по размерам зерна и механическим свойствам. Приведены примеры конкретных изделий, полученных методами объёмного деформирования ИПД.

**Ключевые слова:** интенсивная пластическая деформация, ультрамелкозёрненная структура, градиентная микроструктура, промышленное применение ИПД

### 1. Введение

Термин "Интенсивная пластическая деформация" (ИПД) возник в начале 1990-х гг. и связан с работами Р.З. Валиева [1] с соавторами, однако начало исследований в данной области было положено ещё раньше в работах П. Бриджмена, О. Холла, Н. Пётча и В. Сегала [2, 3, 4, 5]. В данной области опубликовано огромное количество статей и монографий, что вылилось в образование нового направления в науке. Основным направлением применения ИПД является получение материалов с ультрамелкозернистой структурой (УМЗ) с возможностью получения межзёренных границ с большими углами разориентации, доля которых в УМЗ-материалах доходит до 70...80% [6]. Структура межзёренных границ при ИПД оказывает большее, чем в обычных поликристаллах, влияние на механические свойства [7]. Поскольку форма очага пластической деформации, характер нагружения, условия трения, микроструктура и ряд других параметров существенным образом различаются, предлагается разделить эти способы на два направления: методы ИПД с объёмной деформацией (близкая к однородной), и методы ИПД с локальной деформацией (может быть однородной или неоднородной). В статье приводится обзор наиболее распространённых способов ИПД с объёмной деформацией. Это способы равноканального углового прессования (РКУ), кручение под высоким давлением (КВД), всесторонняя ковка (ВК), винтовая экструзия (ВЭ), циклическая экструзия ("песочные часы" (ПЧ) или иначе "бегающая шейка"), а также комбинация метода РКУ + прессование по схеме «Конформ» (*Conform*). Перечисленные способы предназначены для получения УМЗ-материалов под последующую обработку (по сути – заготовок). Исключение составляют разве что методы многократного выдавливания и валковая штамповка, позволяющие получать практически готовые изделия.

Статья посвящена методам ИПД с объёмной деформацией, проведено их сопоставление друг с другом и обозначены проблемы, сделано заключение о возможности применения в серийном производстве.

### 2. Описание и сопоставление методов

Все методы ИПД обеспечивают достаточно высокую степень деформации. Непременным условием для этого является создание высокого гидростатического или квазигидростатического давления сжатия. Значение этого давления зависит от применяемого метода и находится в пределах 0,5...8,0 ГПа, но может быть и выше (до 50 ГПа при КВД). В результате воздействия высоких давлений деформируемость материалов растёт, происходит формирование более плотных дислокационных скоплений, что в конечном итоге и приводит к образованию УМЗ-структуры. Требуемую для этого степень деформации оценивают значением 6...8 и выше. Величина зерна в отдельных частях обработанных материалов может достигать 40...50 нм и меньше (в сплавах до 10 нм), но средний размер составляет величину, примерно в три раза большую.

Значительную роль, оказывающую влияние на величину зерна, играет масштабный фактор [8]. По мнению авторов этой работы, локализация очага деформации при ИПД, способствует большему измельчению зерна. Причина связана со сменой механизма деформации от внутризёренного дислокационного сдвига к зернограничному

проскальзыванию по полосам т.н. кооперативного зернограничного проскальзывания. Образование полос происходит, если в материале имеется достаточное множество границ и для этого требуются меньшие напряжения, чем для сдвига внутри зерен.

Измельчение зерна и изменение межзёренных границ способствует увеличению прочности и предела выносливости материала. Прочность наноструктурированных УМЗ-материалов повышается в несколько раз (3–4 и выше), усталостная прочность и выносливость в 1,5–2 раза в зависимости от числа циклов нагружения, а после отжига – в 1,5–2,5 раза. Твёрдость  $HV$  повышается в 2–3 раза и выше. Значение этих показателей зависит от марки материала и способа ИПД. Негативным качеством любой ИПД-обработки, является снижение коррозионной стойкости и электропроводности обработанных материалов.

#### Равноканальное угловое прессование.

Самым известным методом ИПД является РКУ. Использованный в нём подход стал основой для разработки многих новых методов получения материалов с УМЗ-структурой. Схема метода была предложена ещё в 1972 г. В.М. Сегалом с коллегами, но широкую известность получил позднее, благодаря работам Р.З. Валиева. По сравнению с другими способами ИПД метод РКУ позволяет получать заготовки, однородные как по размеру зёрен, так и по их кристаллографической ориентации. Размер зёрен в отдельных частях заготовки составляет до 100 нм, но в основном размер зерна при РКУ достигает 150–300 нм. Диаметр обрабатываемых заготовок – до 20 мм. Максимальный диаметр 40 мм на Ti, 150 мм на Mo и 90 мм на Al; длина заготовок до 200 мм. В работе [9] показана возможность изготовления заготовок прямоугольного сечения с размерами 50 на 50 мм в поперечном сечении и длиной 500 мм из алюминиевого сплава Al-6060 (содержит около 98,8% Al). Деформация носит сдвиговый характер. Теоретически она была вычислена в [10] и составляет примерно 1,7 за проход при реализации расчётной схемы с линиями тока на внешнем и внутреннем угле контейнера (рисунок 1, а).

Высокие степени деформации при РКУ достигаются в основном за счёт наложения гидростатического давления (до 2 ГПа). В некоторых работах, например, в [10] отмечается, что вследствие реализации схемы простого сдвига, этому также способствует равномерное распределение полей деформации. Но на самом деле это не так. На рисунке 1, б, в показано искажение координатной сетки при обработке Al-6060 [9]. Здесь видно, что расположенные в центре ячейки менее искажаются, чем те, что находятся на периферии, т.е. деформация неоднородна.

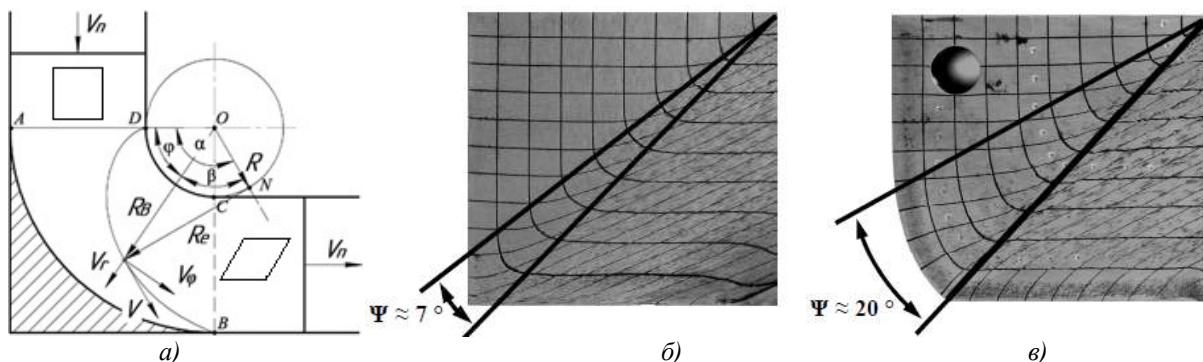
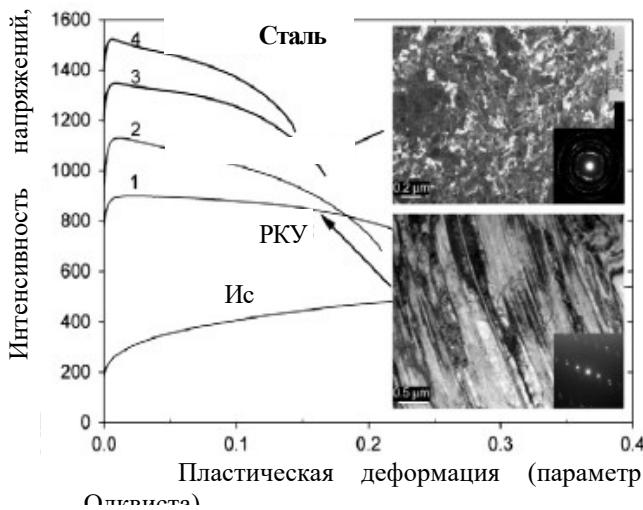


Рисунок 1 – Схемы очага деформации при РКУ:

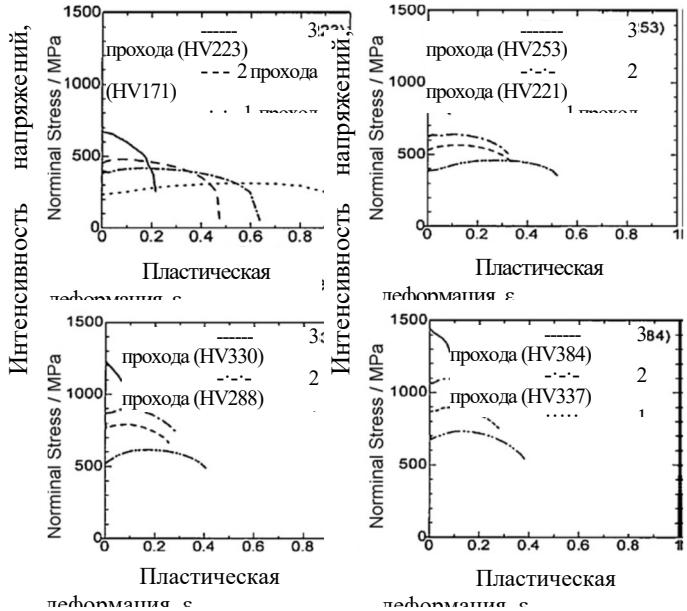
а – траектории деформаций по линии тока на внешнем и внутреннем угле с противодавлением [10]; б – противодавлением 150 МПа и в – без противодавления сплава Al-6060 после одного прохода [9]

Поскольку для получения УМЗ-структурь необходимо добиться получения накопленной степени деформации 6...8 нетрудно подсчитать, что теоретически для этого потребуется совершение 3...4 проходов РКУ. Этого оказывается вполне достаточно, т.к. характерной особенностью большинства процессов ИПД является ограниченное число проходов, после чего происходит насыщение и начинается деградация свойств, в т.ч. механических характеристик: прочности и пластичности, а твёрдость при этом выходит на плато и перестаёт расти. И действительно, в зависимости от материала, деформационное насыщение при РКУ почти достигается уже после 4...6 проходов [11]. На рисунке 2 показана зависимость кривой "напряжение – деформации" от числа проходов для стали аустенитного класса SUS 316 L (аналог стали 03Х17Н14М3). Предел прочности после 4 проходов

увеличился почти в 2,8 раза (с 560 MPa до 1560 MPa). Для стали 08Х18Н9Т почти в 2,5 раза (с 570 MPa до 1400 MPa) [12]. Температура деформации во всех случаях – 150° С. Аналогичные результаты получаются при обработке углеродистых сталей (рисунок 3).



**Рисунок 2 – Зависимость кривой "напряжение – деформации" от числа проходов для аустенитной стали SUS 316 L**



**Рисунок 3 – Соотношение между пределом прочности при растяжении и твердостью образцов из низкоуглеродистой стали (а) и стали 0,15% С (б), 0,25% С (в) и 0,50% С (г) от числа проходов РКУ с последующим отжигом [15]**

Нагрев во всех случаях положительно влияет на способность к деформируемости, микроструктуру и связанные с ней механические свойства. Однако высокая температура снижает параметр Холомона-Зенера, и оказывает влияние на процесс дробления зерна. Для повышения этого параметра применяется даже охлаждение жидким азотом. Особенно важно это при обработке труднодеформируемых материалов, каким являются аустенитные коррозионностойкие стали, конструкционные углеродистые стали, титан и его сплавы и др. Часто их обработка проводится и при повышенной температуре. При нагреве до 500°С прочность аустенитных сталей после ИПД увеличивается примерно в 1,5 раза [14]. При РКУ низкоуглеродистых сталей, а также сталей с содержанием углерода 0,15...0,5% количество проходов до насыщения уменьшается до трёх [16]. Микротвёрдость HV по сравнению с микротвёрдостью исходного образца для низкоуглеродистой стали выросла в 2,85 раза, а для остальных в среднем в 1,76 раза.

Примерно такая же картина (кратность роста предела прочности и микротвёрдости, а также порог насыщения этих свойств от числа проходов) происходит при обработке конструкционных материалов на основе меди. Так после 3 проходов РКУ латуни Л70 (Cu-30Zn) [17] при комнатной температуре происходит значительное улучшение микроструктуры (измельчение зерен и однородность микроструктуры), повышение прочности, микротвёрдости и износостойкости. Микротвёрдость с 75 HV исходного образца вырастает до 237 HV деформированного, т.е. не более чем в 3 раза, а предел прочности при растяжении увеличивается почти в 2 раза. При горячем РКУ в матрице с углом 120° ( $t = 350^{\circ}\text{C}$ ) латуни марки Л60 (Cu-40Zn) сначала гомогенизированной, а затем прокованной и отожжённой перекристаллизация происходит уже после первого прохода с образованием мелкодисперсной структуры в отдельных частях заготовки, и уже в значительной части – после 3 прохода. Полное насыщение механических свойств происходит после 6 проходов, но уже после 4 прохода прочность и микротвёрдость выходят на плато и почти не изменяются [18] (микротвёрдость выросла почти в два раза (с 82 до 160 HV), а прочность – примерно в 1,3 раза (с 350 до 470 MPa)).

Ещё один конструкционный материал – это бронзы. В работе [21] приводятся сведения о положительном влиянии РКУ на стойкость к окислению оловяннистой безфосфорной бронзы (содержание Sn около 2%). Чем больше число проходов, тем выше её коррозионная стойкость (в

отличие от ИПД-обработки сталей). Насыщение механических свойств с выходом на плато происходит после 4 проходов. Авторы [19] объясняют такое поведение бронзовых сплавов механизмом, контролируемым диффузией.

При РКУ алюминиевых сплавов количество проходов, требующееся для насыщения механических свойств может оказаться значительно выше, чем для стали и медных сплавов. Так, например, в работе [20] приводятся результаты исследования РКУ-обработки  $Al - Mg$ -сплавов. После 6 проходов пластичность выходит на плато, дробление зёрен прекращается, но прочность продолжает расти за счёт создания высокоугловых границ. Чем больше содержание алюминия в сплаве, тем больше размер зерна. Для сплава  $Al-5Mg$  средний размер зерна 100  $\mu m$ , а для  $Al-1,5Mg - 300 \mu m$ . Такое различие в пороге насыщения свойств объясняется свойствами  $Al$ . Чистый алюминий при РКУ фрагментируется и наноструктур не образует.

Способ РКУ отличается относительной простотой (проще инструментальная оснастка, применение стандартного оборудования) с возможностью получения заготовок из пластичных и малопластичных материалов. Имеет ограничение по размерам из-за высоких потребных деформирующих нагрузок. Применяется для получения наноструктурированных УМЗ-материалов в основном медицинского назначения.

#### **Кручение под высоким давлением (КВД)**

Второе название способа – *интенсивная пластическая деформация кручением (ИПДК)*. Сущность способа заключается в создании высокого гидростатического давления за счёт сжатия с кручением в закрытом контейнере. Существенное измельчение структуры при КВД наблюдается уже после деформирования на пол-оборота, но для создания однородной наноструктуры требуется деформация в несколько оборотов. Обычно размер зёрен на 100-200  $\mu m$  меньше, чем при РКУ и составляет порядка 40–100  $\mu m$ .

При ИПД-обработке сплава  $Al_3Mg0,25Sc$  после 5 проходов при комнатной температуре под давлением 6 ГПа насыщение микротвёрдости, также, как и при РКУ происходит уже после 4–5 проходов [21]. Степень деформации за проход (один оборот) может достигать 15 и выше [11]. Для сталей аустенитного класса, обработанных за 9 проходов в интервале температур 20...400 °C микротвёрдость  $HV$  достигает значений 5...6 ГПа, а при повышении температуры обработки снижается примерно до 1,5 ГПа [22]. Размер зерна при комнатной температуре обработки порядка 70...40  $\mu m$  (в низкоуглеродистой стали – около 100  $\mu m$ ), а при температурах выше 400° С размер зёрен возрастает.

Здесь прослеживается тенденция, связывающая почти все методы ИПД: химический состав материалов, принадлежащих к одной группе, практически не оказывает влияния на микротвёрдость, а вот влияние температуры – существенно.

Перспектив промышленного применения КВД практически не имеет вследствие малого размера образцов (диск диаметром 10–20  $mm$  и толщиной до 1  $mm$ ). Однако, за счёт высокой степени гидростатического сжатия (высокой степени деформации), данный способ хорошо подходит для исследования физики ИПД в лабораторных условиях. По числу научных публикаций способ КВД (ИПДК), также, как и РКУ, находится среди лидеров.

#### **Всесторонняя ковка (ВК).**

ВК применяется для получения массивных УМЗ заготовок. Метод заключается в использовании многократного повторения операций свободной ковки (до 20 раз), со сменой оси прилагаемого деформирующего усилия, в закрытом контейнере. Каждый проход (цикл) предполагает 3-х кратную смену осей деформирования. Количество циклов – до 20. Однородность деформации по сравнению с РКУ и КВД получается ниже, но поскольку обработка осуществляется при повышенной температуре (0,3–0,6  $T_{пл}$ ), данный способ позволяет получать УМЗ состояние в хрупких материалах. Схема процесса ВК показана на рисунке 4, *a* [24].

Материалом для исследований обычно служит титан и его сплавы, а также сплавы на основе магния, алюминия, никеля и др. В работе [23] описано получение в чистом титане микроструктуры с размером зерна до 100  $\mu m$ . Размер заготовок – до 200  $mm$ . На рисунке 4, *b, в* [25] показаны кривые упрочнения и микротвёрдость оловянной термообработанной бронзы (300°C и охлаждение в воде) с высоким содержанием свинца ( $Cu-17$  мас.%,  $Pb-6$  мас.%,  $Sn-4,5$  мас.%,  $Zn$ ). После 9 проходов происходил выход на плато, размер зерна составил 240-90  $\mu m$ , что сопоставимо с другими методами ИПД.

Несмотря на то, что при ВК могут достигаться высокие степени деформации, чистые металлы, наноструктур не образуют (также как при РКУ). В работе [24] представлены данные по исследованию упрочнения чистого алюминия при единичном обжатии  $\Delta\epsilon = 0,075$ . После полных 4 циклов упрочнения практически не было, а зерно фрагментировалось и не измельчалось.

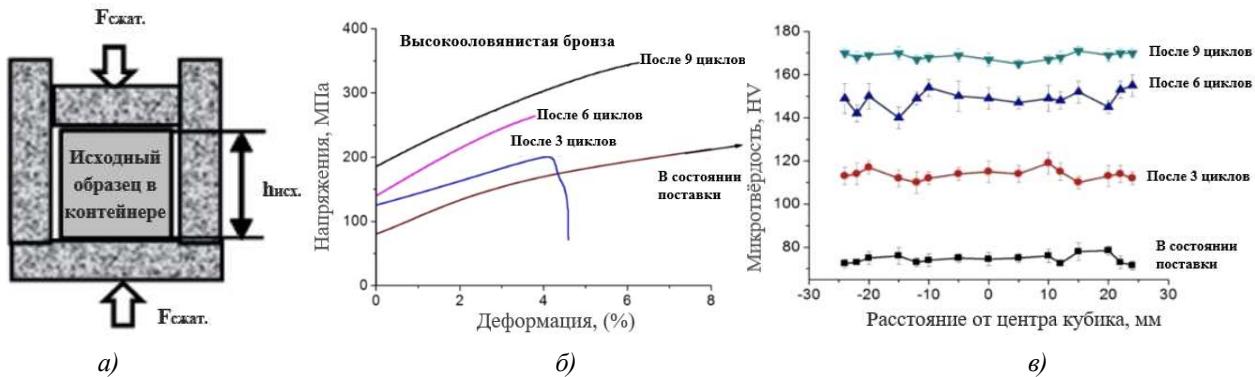


Рисунок 4 – Всесторонняя ковка: схема способа (а) [24]; кривые упрочнения и микротвёрдости для оловянной высокосвинцовой бронзы от числа проходов (б, г) [25]

Этот способ позволяет получать УМЗ-материалы с высокой однородностью, что показывают графики на рисунке 4, в. Что касается размеров заготовок, то они довольно большие и превышают размеры для большинства способов ИПД. Схема всестороннего гидростатического сжатия, благоприятствующая возникновению условий для ИПД, здесь образуется за счёт крайне низкой степени деформации при единичном обжатии. Растигивающие напряжения не достигают существенных значений.

Данный способ имеет хорошую возможность практического применения, в том числе, для производства крупногабаритного листового проката. В этом случае ВК-технология является подготовительной операцией перед традиционной продольной прокаткой [26].

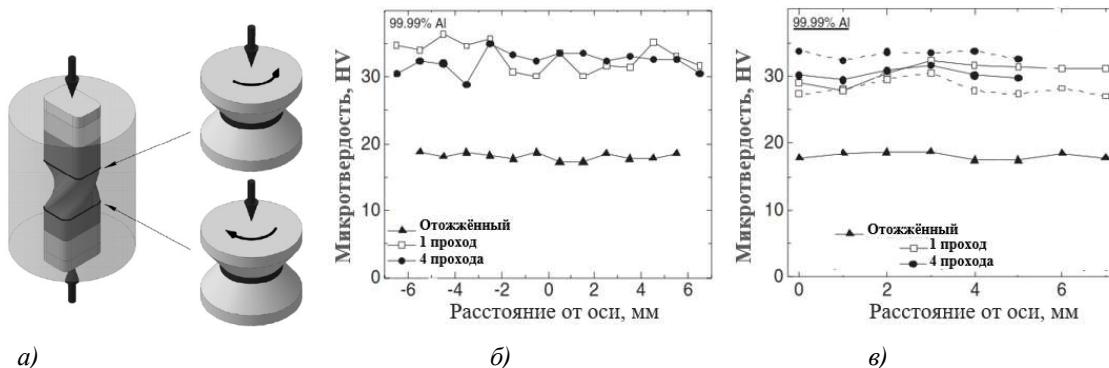
#### Винтовая экструзия (ВЭ)

Способ был предложен Донецкими учёными больше 20 лет назад [27, 28]. Позволяет обрабатывать стержни прямоугольного сечения (до 30...40 мм) относительно небольшой длины (до 140...150 мм). Осуществляется выдавливанием через винтовую матрицу в несколько проходов, число которых обычно равно 4...5. Характер нагружения делает этот процесс похожим на кручение под высоким давлением (КВД). Общий между ними является создание простого сдвига (рисунок 5, а). Величина сдвиговой деформации за проход приблизительно равна 2, что ниже, чем при КВД приблизительно в 7 раз. Максимальное значение степени деформации наблюдается в наиболее удаленных от оси частях образцов, а в центре на оси образцов степень деформации нулевая. Средний размер зёрен в сплавах на основе меди и алюминия составляет 200–300 нм, а в ВТ1-0 – 1000 нм (после 3 проходов).

Фрагментацию зерна при ИПД-обработке некоторых чистых металлов можно косвенно подтвердить результатами ИПД-обработки чистого алюминия (99,99% Al). На рисунке 5, б, в представлена зависимость распределения микротвёрдости, измеренной в поперечном и продольном сечении [29]. После 4 прохода деформация в поперечном сечении становится неоднородной. Твёрдость выросла в среднем в 1,5 раза. Средний размер зёрен составил при этом около 1,6 мкм, а максимальная степень совершённой деформации – около 8. Разброс свойств в поперечном сечении связывают с неоднородностью деформации вблизи продольной оси. Насыщение наблюдалось уже после 2 прохода из-за фрагментации зерна. Представленные результаты согласуются с результатами, полученными при обработке методами РКУ и КВД, из чего авторы [29] заключают, что схема нагружения при ИПД не влияет на изменение микроструктуры и механических свойств, которые зависят только от степени совершённой деформации. Это утверждение находится и в выводах к работе [30].

Способ может применяться в качестве подготовительного перехода перед РКУ, связывающей прокаткой (СП) и некоторыми другими видами ИПД-обработки с малой повреждённостью, наследуемой при последующей обработке. Так, при использовании СП титанового сплава ВТ1-0 в качестве последующей обработки после ВЭ, получается мелкозернистая структура (до 500 нм), а анизотропия механических свойств практически

исчезает. Преимуществом этого способа является высокая производительность, а недостатком – неравномерность деформации, наименьшее значение которой находится вблизи оси экструзии (как при КВД). Из недостатков способа отмечают формирование анизотропной структуры, приводящей к сильному разбросу механических свойств.

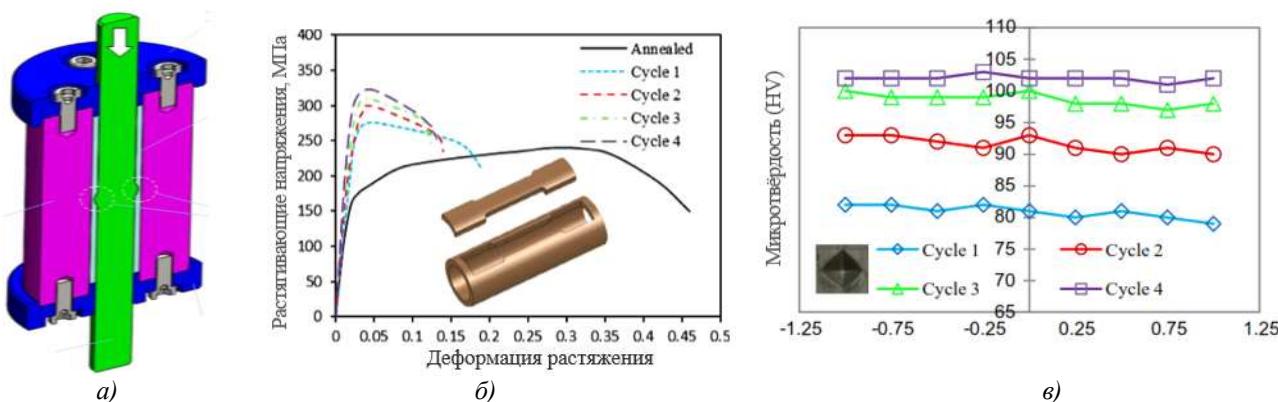


**Рисунок 5 – Винтовая экструзия:** схема способа (а) и зависимость распределения микротвёрдости от числа проходов при обработке чистого алюминия в поперечном и в продольном сечении (б, г) [29]

Винтовая экструзия относится к числу способов ИПД, имеющих лабораторный характер, но, по мнению международных экспертов, входит в пятерку процессов с наибольшими перспективами промышленного применения [30].

#### Метод "Песочные часы" (ПЧ)

Ещё один лабораторный метод ИПД, который заключается в многократном циклическом деформировании металла экструзией или прессованием, через отверстие в матрице, имеющее местное сужение, напоминающее по форме песочные часы (отсюда название метода). В иностранной литературе получил наименование *метод циклической экструзии–сжатия*. Заготовка может быть в виде стержня, или в виде трубы. В первом случае происходит упрочнение по наружной поверхности, во втором – по внутренней (рисунок 6, а). На рисунке 6, б, в показаны зависимости изменения механических характеристик [31] чистой меди (99,99% Cu) от числа проходов. Величина единичного обжатия 0,16. После четырех циклов обработки зерна уменьшились с исходного размера 45 мкм до 200...350 нм, т.е. в 225...128 раз! Микротвёрдость увеличивается примерно в 2 раза (от исходной 55 HV до 102 HV после 4 прохода), причём её распределение по сечению – равномерно. Насыщение механических свойств наступает через 4...5 проходов, после чего в образце накапливаются большие деформации, носящие характер чистого сдвига.



**Рисунок 6 – Метод «Песочные часы»:** схема способа при обработке втулки изнутри (а) [31]; кривые упрочнения (б) и распределение микротвёрдости по толщине стенки от средней линии (в) для чистой меди

Несколько отличные результаты получены при обработке стержня из алюминиевого сплава AA6061 (ок. 97,4% Al) [32], предварительно отожжённого при температуре 425° С. Величина единичного обжатия составляла 0,66 за проход, что достаточно много. Микротвёрдость резко возрастает уже после одного прохода (с 40 HV до 65 HV...68 HV) и в последующих циклах практически не меняется ( $HV \approx 70$ ). Средний размер зёрен после четырех циклов достиг примерно

5...6 мкм по сравнению с исходным значением в 100 мкм без образования наноструктур, что связано с частичной фрагментацией зёрен (в отличие от меди). Так, при ПЧ-обработке при единичном обжатии 0,15 сплава *AlMgSi* (6082) фрагментации уже не происходит, а средний размер зерна равен примерно 100 нм (77,5 нм...187,1 нм).

Отрицательным свойством метода ПЧ является сильный нагрев инструмента (как и при винтовой экструзии), что вынуждает производить обработку при крайне низких скоростях деформирования. Ввиду этого, а также из-за чрезмерно высокой степени износа инструмента в локальной зоне контакта, метод *песочных часов* может использоваться лишь для обработки "мягких" материалов (меди, алюминий и сплавы на их основе). Поэтому он малопригоден для промышленного применения. Так в опытах с чистым алюминием при ПЧ-обработке стержня со скоростью деформирования 12 мм/мин в условиях жидкостного трения микротвёрдость увеличилась вдвое уже после 2 прохода (с 40 HV до 80 HV) при среднем размере зерна 400 нм [33]. При обработке меди скорость обработки была и того меньше – 5 мм/мин [31].

В настоящее время несколько групп исследователей работают над расширением возможностей данного метода применительно к обработке труднодеформируемых сплавов при повышенных температурах и скоростях деформирования. В работе [34] предлагается технология, совмещающая в одном цикле (проходе) операции РКУ и ПЧ. При обработке титанового сплава *Ti6Al4V* после первого прохода удалось достигнуть степени деформации 3...3,5, средний размер зерна составил порядка 100 нм, а твёрдость, измеренная вблизи центральной и внешней поверхностей образца в зоне РКУ, достигла 21...24 HRC, а в зоне ПЧ (после РКУ) – 31...28,7 HRC (температура обработки была 300° С, а скорость деформирования 12...21 мм/мин).

Предполагается, что благодаря благоприятной схеме нагружения (растяжение-сжатие) при использовании метода ПЧ возможно накапливать сколь угодно большие деформации. Исследования в этом направлении проводятся, но достоверных результатов мы пока не имеем. В целом же, учитывая отмеченные особенности (перегрев и повышенный износ инструмента), можно заключить, что данный метод пока малоперспективен для промышленного применения.

### 3. Практическое применение

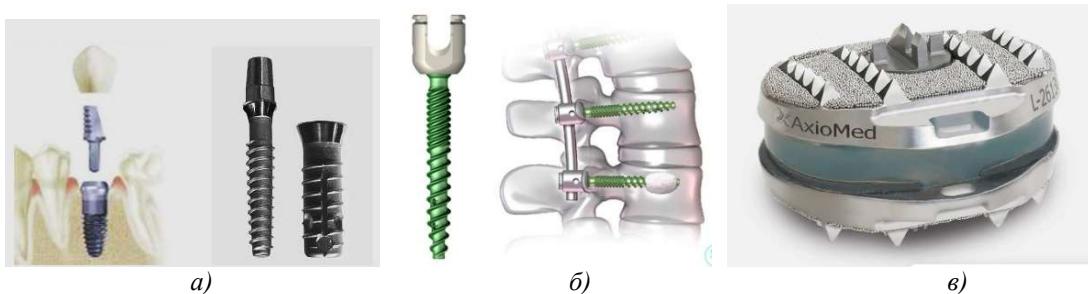
Сегодня уже нельзя сказать, что технологии ИПД носят только исследовательский характер и не имеют прикладного значения. Ниже демонстрируются возможности этих технологий на примере конкретных изделий. Так, с применением технологии РКУ получили крепёж специального назначения. Болты (рисунок 7, а), изготовленные из стали 20 с УМЗ структурой, соответствуют классу прочности 6.6, а из стали марки 45 классу прочности 8.8 [35]. Обычно такие показатели обеспечиваются термической обработкой легированных марок стали типа 40Х. Метизы, изготовленные из алюминиевого сплава АД1 (рисунок 7, б) методом многократного выдавливания при температурах ниже температуры рекристаллизации, можно упрочнить в 2,4 раза [36]. Недостатком является большое количество проходов.



**Рисунок 7 – Примеры изделий с УМЗ структурой, полученных с применением технологий ИПД:**  
болты железнодорожного применения из стали 20 (а) [35] и спецкрепёж из сплава АД1 (б) [36]

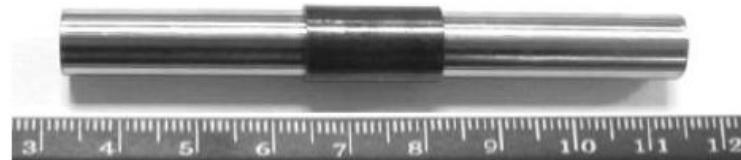
Технология ИПД находит применение и в такой важной отрасли, как медицина. Примерно пятнадцать лет назад в Уфе построен производственный участок [37] по выпуску высокопрочных длинномерных УМЗ полуфабрикатов из технически чистого титана для медицинского применения (чистый титан не вызывает отторжение организма человека). В [38, 40] показано, что у наноструктурного УМЗ титана процесс интеграции с костными тканями проходит намного быстрее, чем у крупнозернистого титана. Кроме того, механические свойства таких изделий намного выше: предел прочности достигает значений 1250–1300 МПа. Усталостная прочность

также достигает высоких значений, что позволяет минимизировать размеры таких изделий, как, например, зубные (рисунок 8, а) и позвоночные (рисунок 8, б, в) имплантаты [40].



*Рисунок 8 – Примеры изделий медицинского применения с УМЗ структурой из титана, полученных с применением технологий ИПД [40]: зубной (а), позвоночный (б) и дисковый шейного отдела (в) имплантаты*

Важным направлением применения технологий ИПД сегодня является авиакосмическая отрасль и военно-промышленный комплекс, а также атомная промышленность. Проводились исследования [41, 42] получения изделий термомеханических соединений (ТМС) трубопроводов из Ti-Ni-Fe сплава с УМЗ структурой. Для таких соединений требуется повышенная прочность, обеспечивающая несущую способность, память формы, низкотемпературную стабильность и легкоразборность. На рисунке 9 показана ТМС-муфта из никелида титана (TiNi), изготовленная с применением РКУ.



*Рисунок 9 – Соединение трубопроводов с помощью термомеханической муфты [36]*

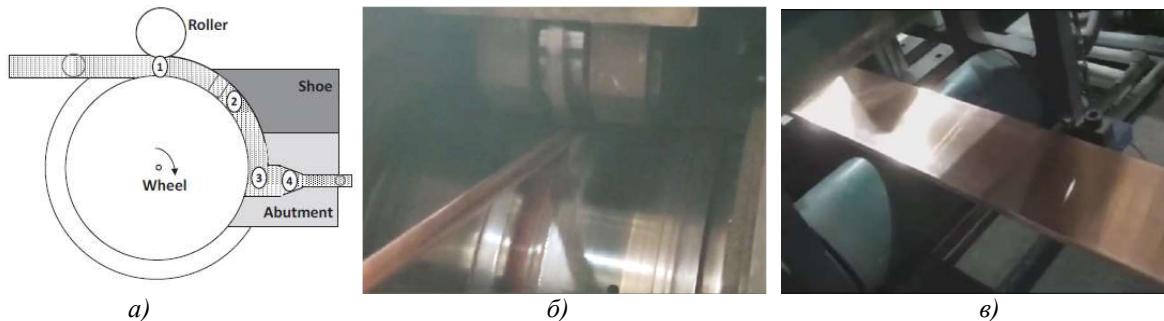
Для сравнения, величина погонной силы сдвига  $F$  термомеханического соединения для закаленной муфты составила 7800 Н/мм, что даёт величину удельного окружного усилия обжима 554 Н/мм, а соединения, изготовленного с применением РКУ-прессования имеют погонную силу уже 16100 Н, а усилие обжима 1144 Н/мм. Т.е., получено двукратное увеличение механических характеристик.

Перспективным направлением применения ИПД является производство изделий, важной характеристикой которых является огнестойкость. В настоящее время повышение огнестойкости низкоуглеродистых строительных сталей достигается легированием, микролегированием и использованием термодеформационной обработки, обеспечивающей торможение процессов разупрочнения при повышенных температурах. Повышения огнестойкости сталей достигается также за счет формирования УМЗ-структур с размером зерна меньше 1 мкм [36]. В работах [43, 44] описаны результаты измельчения микроструктуры строительных сталей методами КВД и РКУ. Первый из них – это лабораторный метод, но РКУ при температурах обработки выше 600°C повышает прочностные свойства некоторых строительных сталей (10Г2ФТ и 06МБФ) на 20–25%. Холодное РКУ привело к повышению предела прочности выше 1000 МПа при среднем исходном значении 490 – 590 МПа. Пластичность при этом сохранилась в тех же пределах – 21...22%. Эти показатели сохраняются при нагреве до 700° С. Таким образом, использование ИПД-технологий, в частности РКУ, для изготовления длинномерных огнестойких изделий имеет перспективы для массового производства строительных конструкций. Однако метод РКУ здесь не подходит из-за отсутствия специального оборудования получения требуемого сортамента.

Решением проблемы является применение технологии «Конформ» [45]. Принцип был предложен ещё в 1972 г. в Англии (Green D. // J.Inst Metals., 1972. V. 100. P. 295). Главным отличительным признаком от РКУ является способ продвижения материала по каналу инструмента. При РКУ продвижение осуществляется за счёт «жёсткого» выдавливания с помощью плунжера (пуансона), при «Конформ» – за счёт вращения рабочего инструмента.

Известны три модификации метода: в комбинации с прокаткой, прессованием и выдавливанием (экструзией). Принцип осуществления «Конформ» по схеме РКУ+выдавливание показан на рисунке 10, а [46]. Этот подход уже нашёл применение в масштабах серийного производства для изготовления проката как круглой, так и прямоугольной формы неограниченной длины (возможность изменения формы поперечного сечения заготовки показана в работе [47]). Сегодня таким способом изготавливают алюминиевые и медные провода и шины, в т.ч. высоковольтные для ж/д транспорта [48]. На рисунке 10, б, в представлены фото до и после ИПД-обработки по схеме РКУ+выдавливание при изготовлении медной шины размером до  $12 \times 100$  мм на заводе Эксперт-кабель, г. Орёл с помощью промышленной установки RY-TBJ500 (Chanzhou Riyue Machine Co., Ltd., Chine).

В [49] приводятся результаты по обработке методом «Конформ» титанового сплава.



*Рисунок 10 – Метод «Конформ»: схема комбинации РКУ с выдавливанием (а) [46] и медная шина прямоугольного сечения, полученная из круглого проката на заводе Эксперт-кабель, г. Орёл (б, в)*

В процессе обработки шина разогревается до высоких температур (порядка  $700^{\circ}\text{C}$ ), поэтому пластические свойства материала сохраняются при достижении предела прочности порядка  $200\text{ MPa}$ . Микроструктура становится однородной с размером зерна около  $100\text{ нм}$ . Высокая температура обработки препятствует снижению электропроводности. Одним из недостатков является повышенный износ формообразующего инструмента. Но это свойственно многим процессам обработки металлов давлением непрерывного типа, например, волочения.

Все представленные на фото образцы можно считать серийными. И это почти всё, что есть на сегодня в индустрии ИПД-материалов, нашедших практическое применение. Такое положение вещей требует объяснения.

#### 4. Проблемы применения в серийном производстве

Обсуждение проблем промышленного использования ИПД можно провести на материале обзора [15]. Вышедший более 10 лет назад, он не утратил своей актуальности и сегодня. В частности, там говорится, что УМЗ сплавы используются как конструкционные материалы благодаря их высокой прочности, пластичности и износостойкости (болты из титановых сплавов, обработанные с помощью РКУ). Однако буквально парой абзацев ниже авторы утверждают прямо противоположное: на практике, несмотря на ряд повышенных механических и физических свойств УМЗ материалов, их освоение промышленностью до сих пор протекает крайне медленно. В качестве основных причин указываются следующие. Прежде всего, это отсутствие осведомлённости об УМЗ-материалах. Другая причина связана с нехваткой УМЗ-образцов нужных размеров для промышленных испытаний (образцы, производимые в лабораториях, обычно очень малы, потому что предназначены для исследовательских целей). Наконец, до конца всё ещё не ясно, какие из многочисленных лабораторных методов окажутся наиболее подходящими для промышленного применения и будут обладать коммерческой жизнеспособностью. Такую оценку выполнить достаточно трудно. Наблюдается также отсутствие знаний о том, как следует обрабатывать УМЗ сплавы. Таким образом, проблемы применения ИПД-технологий в серийном производстве можно разделить на три группы: производственно-технологические, научные и бизнес-проблемы.

Производственно-технологические проблемы связаны с различными причинами. Так, далеко не всегда все детали устройства можно заменить на изделия из УМЗ материалов. Так, детали и узлы, испытывающие наиболее высокие силовые нагрузки, изготавливают из высокопрочной стали, и увеличить её прочность в разы, как это происходит при ИПД обработке пластичных сплавов, довольно сложно. Приведём конкретный пример. Как правило, подшипник

скольжения представляет собой стальной вал и бронзовую втулку. С помощью многоциклической упрочняющей обкатки втулку можно упрочнить почти в 4 раза [50]. Но это приведёт к быстрому износу вала, который также придётся упрочнить, что для высокопрочной стали уже проблематично.

Ещё одно препятствие связано с нежеланием производителей менять давно отлаженные технологические цепочки, что влечёт за собой существенные затраты на проведение конструкторско-технологической подготовки производства: разработку новых технологий и приобретение оборудования. Ситуация усугубляется и отсутствием доступной и удобной технологической документации, позволяющей инженерам самостоятельно разрабатывать конкретные технологические процессы.

К проблемам научного характера можно отнести отсутствие знаний по некоторым важным вопросам. Например, несмотря на широкое использование математических моделей, практически отсутствуют данные о траекториях деформирования и нагружения, которые можно было бы из этих моделей извлечь. Эта информация могла бы лежать в основу классификации процессов ИПД, ведь их такое множество, что потенциальные производители ИПД-материалов затрудняются сделать свой выбор в пользу какого-либо из них [51]. Между тем, внешне различные способы ИПД могли бы оказаться близкими по траектории деформации и тем самым приводить к одинаковым результатам в смысле микроструктуры и свойств ИПД-материалов. И вообще, параметры процессов оказывают лишь косвенное влияние на свойства ИПД-материалов. Непосредственное же влияние оказывает траектория (история) деформирования, и именно это влияние должно стать предметом изучения. Так, для более полного теоретического описания РКУ интересным представляется проследить траектории нагружения и деформации и в 5-мерном пространстве Ильюшина и поискать сходство с традиционными способами ОМД. В частности, важно определить кривизну траектории деформации, чтобы понять, какой вариант теории течения будет наиболее подходящим для численного моделирования. Также, важно установить связь траектории деформации с микроструктурой.

И, наконец, проблемы бизнеса. Коротко можно выразить так: при интенсивном развитии мировой экономики на рынке появилось множество новых стран с высоким уровнем технологического развития. Эти страны вносят большой вклад в общую долю рынка, замещая собой традиционных производителей на конкурентной основе. Всем становится невыгодно изготавливать детали с большим ресурсом работы. Те времена, когда, например, двигатели внутреннего сгорания некоторых автопроизводителей при правильной эксплуатации имели огромный ресурс работы – прошли. В современном мире понятие долговечности можно применить лишь к жизненно-важным продуктам: в медицине, аэрокосмической отрасли и ВПК.

## 5. Заключение

Все рассмотренные методы ИПД характеризуются насыщением свойств при одной и той же степени совершённой деформации, которая достигается независимо от пути нагружения. Самый популярный способ РКУ отличается простотой реализации и позволяет получать УМЗ-материалы из различных конструкционных материалов, включая малопластичные, имеет ограничение по размерам из-за высоких деформирующих нагрузок. Традиционно принято считать, что в РКУ деформация носит сдвиговый характер, однако это утверждение справедливо лишь для конечной стадии процесса. В ходе же самого процесса форма ячеек координатной сетки меняется сложным образом, что необходимо учитывать при теоретическом описании. Условия деформирования у стенки и в середине заметно различаются, что ведёт к неоднородности материала. Это хорошо видно поискажению координатной сетки на рисунке 2, б, в.

Винтовая экструзия, также как РКУ, проста в реализации, но инструментальная оснастка сложнее. Отличается формированием анизотропной структуры, приводящей к сильному разбросу механических свойств, может сочетаться с РКУ и по мнению экспертов, входит в пятерку процессов с наибольшими перспективами промышленного применения. Деформация при ВЭ близка к простому сдвигу, поэтому необходимость численного моделирования отпадает вместе со всеми связанными с ним затратами. Процесс описывается простыми аналитическими выражениями. Поскольку реверса нагружения не происходит, это приводит к образованию текстуры, и её влияние на анизотропию механических свойств обработанных заготовок пока не изучено.

Всесторонняя ковка позволяет получать заготовки с размерами, превышающими размеры для большинства способов ИПД. Благодаря частой смене осей нагружения и малой амплитуде деформации, получается изотропный однородный материал с несформировавшимися мезо- и макро-дефектами, что препятствует образованию трещин и повышает износостойкость материала. ВК отличается трудоёмкостью реализации из-за необходимости смены осей приложения нагрузок. Имеет хорошую возможность практического применения для производства деталей из различных металлов и сплавов.

Метод «Песочные часы» теоретически позволяет накапливать сколь угодно большие деформации, но учитывая повышенный износ и перегрев инструмента в локальной зоне и, как следствие, крайне низкие скорости деформирования, данный метод малоперспективен для промышленного применения и пригоден в основном для обработки мягких материалов.

На сегодняшний день из всех способов ИПД наиболее широкое применение в серийном производстве нашла технология «Конформ», что связано с массовой потребностью в получаемой этим методом продукцией. Стоимость оборудования (станы «Конформ») относительно невысока, порядка 250000 \$, что, однако в разы выше стоимости гидропрессов, которые необходимы для осуществления остальных, рассмотренных в этой статье способов.

*Работа выполнена в ОГУ имени И.С. Тургенева в рамках государственного задания № 075-01466-23-07 на 2023 год и на плановый период 2024 и 2025 годов от 24.11.2023 г., проект № FSGN-2023-002 (1023082800024-8-1.3.2).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R.Z. Valiev, N.A. Krasilnikov, N.K. Tsenev, Plastic deformation of alloys with submicron-grained structure [Текст] // Materials Science and Engineering: A, 1991, Vol. 137, pp. 35.
2. Bridgman P.W. Effects of High Shearing Stress Combined with High Hydrostatic Pressure [Текст] // Phys. Rev. 48, 825 – Published 15 November 1935
3. E.O. Hall, The deformation and ageing of mild steel. Discussion of results [Текст] // Proceedings of the Physical Society of London B, 1951, 64., pp. 747–753.
4. N.G. Petch, The cleavage strength of polycrystals [Текст] //Journal of Iron & Steel Institute 1953, 174. pp. 25–28.
5. Сегал В.М., Резников В.И., Копылов В.И. Процессы пластического структурообразования металлов [Текст].- Минск: Наука и техника, 1994. - 231 с.
6. R.Z. Valiev, Y. Estrin, Z. Horita, T.G. Langdone, M.J. Zehetbauer, Y. Zhu, Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation: ten years later [Текст] // JOM- The Journal of minerals, metals & materials society, 2016, Vol. 68, No. 4, pp. 1216-1226
7. X. Sauvage, G. Wilde, S. Divinsky, Z. Horita, R.Z. Valiev, Grain boundaries in ultrafine grained materials processed by severe plastic deformation and related phenomena [Текст] // Materials Science & Engineering A, 2012, Vol. 540, pp. 1-12.
8. Ф.З. Утяшев, Наноструктурирование металлических материалов методами интенсивной пластической деформации [Текст] // Физика и техника высоких давлений 2010, том 20, № 1. с. 7 – 25.
9. P. Frinta, M. Hockauf, T. Halle, G. Strehl, T. Lampke and M.F.-X. Wagner, Microstructural Features and Mechanical Properties after Industrial Scale ECAP of an Al-6060 Alloy [Текст] // Materials Science Forum ( 2011), Vol. 667-669, pp. 1153-1158
10. Ф.З. Утяшев, Особенности интенсивной пластической деформации и структурообразования металла [Текст] // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки № 4-1(182), 2013, с. 204 – 212.
11. Y. Estrin, A. Vinogradov, Extreme grain refinement by severe plastic deformation: a wealth of challenging science [Текст] // ActaMaterialia.- 2013, 61. pp. 782–817.
12. S.V. Dobatkin, O.V. Rybalchenko, G.I. Raab, Structure formation, phase transformations and properties in Cr-Ni austenitic steel after equal-channel angular pressing and heating [Текст] // Materials Science & Engineering A, – 2007. – Vol. 463. – P. 41–45.
13. H. Ueno, K. Kakihata, Y. Kaneko, S. Hashimoto, A. Vinogradov, Enhanced fatigue properties of nanostructured austenitic SUS 316L stainless steel [Текст] // ActaMaterialia. 2011. Vol. 59. pp. 7060-7069.
14. X. Huang, G. Yangb, Y.L. Gao, S.D. Wu, Z.F. Zhang, Influence of processing temperature on the microstructures and tensile properties of 304L stainless steel by ECAPC [Текст] // Materials Science and Engineering: A. 2008. - Vol. 485. pp. 643–650
15. A. Azushima, R. Kopp, A. Korhonen, D.Y. Yang, F. Micari, G.D. Lahoti, P. Groche, J. Yanagimoto, N. Tsuji, A. Rosochowski, A. Yanagida, Severe plastic deformation (SPD) processes for metals [Текст] // CIRP Annals - Manufacturing Technology (2008), Vol. 57. pp.716–735.
16. K. Aoki, A. Azushima, Development and properties of high strengthened carbon steels produced by repetitive side extrusion and heat treatment process [Текст] // Materials Science Forum. 2007. Vol. 539–543. pp.2884–2891.
17. Hussein Naser Radhi, Mohsin Talib Mohammed, Alaa M.H. Aljassani, Influence of ECAP processing on mechanical and wear properties of brass alloy [Текст] // Materials Today: Proceedings. 2021.- Vol. 44, pp. 2399–2402.

18. Seyed Elias Mousavi, Mahmood Meratian, and Ahmad Rezaeian, Investigation of mechanical properties and fracture surfaces of dual-phase 60–40 brass alloy processed by warm equal-channel angular pressing [Текст] // Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology: Mater Sci (2017), Vol. 52, pp. 8041–8051
19. M.M. Sadawy, M. Ghanem, Grain refinement of bronze alloy by equal-channel angular pressing (ECAP) and its effect on corrosion behavior [Текст] // Defence Technology (2016), Vol. 12, pp. 316–323
20. Shiteng Zhao, Chenlu Meng, Fengxin Mao, Weiping Hu, Günter Gottstein, Influence of severe plastic deformation on dynamic strain aging of ultrafine grained Al–Mg alloys // Acta Materialia (2014) Vol. 76, rr. 54–67.
21. M. Prabhakar Bhovi, Deepak C. Patil, S.A. Kori, K. Venkateswarlud, Yi Huange, T.G. Langdone, A comparison of repetitive corrugation and straightening and high-pressure torsion using an Al-Mg-Sc alloy [Текст] // Journal of materials research technology, (2016), Vol. 5(4), pp. 353–359.
22. Рыбальченко О.В. Влияние интенсивной пластической деформации на структуру, механические и служебные свойства стали 08Х18Н10Т / Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ин-т металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН. Москва, 2014
23. Салищев Г.А., Валиахметов О.Р., Галеев Р.М., Малышева С.П., Жеребцов С.В., Миронов С.Ю., Иванисенко Э.В. Формирование субмикрокристаллической структуры в титане и титановых сплавах и их механические свойства // Металловедение и термическая обработка металлов, 2006, № 2(608), с.19-26.
24. N.G.S. Almeida, P.H.R. Pereira, C.G. de Faria, M.T.P. Aguilar, P.R. Cetlin, Mechanical behavior and microstructures of aluminum processed by low strain amplitude multi-directional confined forging [Текст] // Journal materials research and technology, 2020, Vol. 9 (3), pp. 3190–3197.
25. Rahul Gupta, Sanjay Srivastava, Nand Kishor Kumar, Sanjay K. Panthi, High leaded tin bronze processing during multi-directional forging: Effect on microstructure and mechanical properties [Текст] // Materials Science and Engineering: A, (2016), Vol. 654, pp. 282-291.
26. Мулюков Р.Р. Развитие принципов получения и исследования объемныхnanoструктурных материалов в ИПСМ РАН // Российские нанотехнологии, 2007, Том 2, № 7–8, 38-53.
27. Бейгельзимер Я.Е., Сынков С.Г., Орлов Д.В. Винтовая экструзия [Текст] // Обработка металлов давлением, 2006, №4, С. 17–22.
28. Y. Beygelzimer, V. Varyukhin, Twist extrusion [Текст] // Физика и техника высоких давлений 2014, том 24, № 2
29. Dmitry Orlov, Yan Beygelzimer, Sergey Synkov, Viktor Varyukhin, and Zenji Horita, Evolution of Microstructure and Hardness in Pure Al [Текст] // Materials Transactions, 2008, Vol. 49, №. 1, pp. 2 - 6
30. Dmitry Orlov, Yan Beygelzimer, Sergey Synkov, Viktor Varyukhin, Nobuhiro Tsuji, and Zenji Horita, Microstructure Evolution in Pure Al Processed with Twist Extrusion [Текст] // Materials Transactions, 2009, Vol. 50, №. 1, pp. 96 - 100
31. A. Babaei, M.M. Mashhadi, Tubular pure copper grain refining by tube cyclic extrusion–compression (TCEC) as a severe plastic deformation technique [Текст] // Progress in Natural Science: Materials International, 2014, Vol. 24, pp. 623–630.
32. Do Xuan Truong, Nguyen Manh Tien, Nguyen Manh Hung, Nguyen Truong An, Effect of the cyclic expansion-extrusion process on mechanical properties and the grain refinement of AA6061 aluminum alloy [Текст] // Journal of Military Science and Technology, 2023, Vol. 87, pp. 100-107.
33. Armin Siah sarani, · Ghader Faraji, Hydrostatic cyclic extrusion compression (HCEC) process; a new CEC counterpart for processing long ultrafine-grained metals [Текст] // Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2020, Vol. 20:108, pp. 2-13.
34. B. Pasoodeh, V. Alimirzaloo, M. Shahbaz, K. Hajizadeh and J. Alizadeh Kaklar, Strain Distribution for CP-Ti in Cyclic Extrusion Compression Angular Pressing by RSM [Текст] // Iranian Journal of Materials Forming, 2023, Vol. 10 (3), pp. 25-35.
35. Чукин М.В., Валиев Р.З., Рааб Г.И., Копцева Н.В., Юфимова Ю.Ю. Исследование эволюции структуры наносталей 20 и 45 при критических степенях пластической деформации // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2007. – №4. – С. 89–93.
36. Утяшев Ф. З., Рааб Г. И., Валидов В. А. Деформационное nanoструктурирование металлов и сплавов. Монография. СПб.: Наукомкие технологии, 2020. –185 с.
37. Рааб Г.И., Валиев Р.З. Равноканальное угловое прессование по схеме «Конформ» длинномерных nanoструктурных полуфабрикатов из титана // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. –2008. – № 1. – С. 21–27.
38. Рааб Г.И., Валиев Р.З. Получение нанокристаллического титана // Материаловедение и термическая обработка металлов. 2000. № 9. С. 27–31.
39. R.Z. Valiev, I.P.Semenova., V.V.Latysh., A.VShcherbakov., E.B. Yakushina Ti for biomedical application: new developments Shcherbakov and challenges for commercialization // Nanotechnologies in Russia. 2008. Vol. 3, Nos. 9–10. Pp. 593–601.
40. R.Z. Valiev, I.P. Semenova, V.V. Latysh, H. Rack, T.C Lowe., J. Petruzelka, L. Dluhos, D. Hrusak, J. Sochova Nanostructured titanium for biomedical applications // Advanced Engineering Materials, 2008. 10, v. 8. p. 15–17.
41. V.V. Stolyarov, A.S Ermolenko., D.V. Gunderov, A.G Popov., G.I. Raab, T.Z. Puzanova, R.Z. Valiev, V.S. Gaviko, E.V. Belozerov Equal-Channel Angular Pressing. Microstructure and Hysteresis Properties of Ultrafine-Grained Pr20Fe73.5B5Cu1.5 Alloy // Proc. 8th European Magnetic Materials and Application Conference, Kyiv. Ukraine. 2000. p. 265–268.
42. Патент РФ №2266973 Способ получения ультрамелкозернистых сплавов с эффектом памяти формы / Столяров В.В., Валиев Р.З., Пушин В.Г., Прокофьев Е.А., Рааб Г.И., и др. // опубл. 27.12.2005.

43. Добаткин С.В., Одесский П.Д., Рааб Г.И. и др. Теплое и горячее равноканальное угловое прессование низкоуглеродистых сталей [Текст] // Металлы. 2004. № 1. С. 105–110
44. Лякишев Н.П., Алымов М.И., Добаткин С.В. Объемные наноматериалы конструкционного назначения [Текст] // Металлы. –2003. – № 3. – С. 3–16.
45. Raab G.I., Raab A.G., Shibakov V.G. Analisis of shear deformation scheme efficiency in plastic structure formation processes [Текст] // Metalurgija.,2015., Vol.54 (2), pp. 423–425
46. Y.L. He, F. Gao, B.Y. Song, R. Fu, G.M. Wu, J. Li and L. Jiang: Grain Refinement of Magnesium Alloys by CONFORM: A Continuous Severe Plastic Deformation Route? [Текст] // Material Science Forum, 2012, Vol. 706-709, pp. 1781 – 1786.
47. Xu C., Schroeder S., Berbon P.B. and Langdon T.G. Experimental and numerical analyses of microstructure evolution of Cu-Cr-Zr alloys during severe plastic deformation [Текст] // Acta Materialia, 2010, Vol. 58, pp. 1379 - 1386.
48. Патент РФ №2685842 Способ изготовления электроконтактного провода для высокоскоростного железнодорожного транспорта // Аксенов Д.А., Асфандияров Р.Н., Рааб Г.И., Рааб А.Г. Опубл. 23.04.2019.
49. Рааб Г.И., Валиев Р.З. Равноканальное угловое прессование по схеме Conform длинномерных наноструктурных полуфабрикатов из титана [Текст] // Кузнечно-штамповочное производство., 2008., № 1., С. 21–27.
50. Gryadunov I.M., Radchenko S.Yu., Dorokhov D.O., Morrev P.G. Deep hardening of inner cylindrical surface by periodic deep rolling -burnishing process [Текст] // Modern Applied Science. 2015, Vol. 9, № 9, p. 251-258.
51. Морев П.Г., Капырин К.И., Радченко С.Ю., Голенков В.А. Современные проблемы технологии ИПД (по материалам периодики) [Текст] // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2023. № 6 (362). С. 28-43.

### Капырин Константин Игоревич

Мценский филиал ФГБОУ ВПО «Орловский государственный университет имени И.С.Тургенева», г. Мценск.  
Кандидат технических наук, доцент кафедры  
инженерно-технических дисциплин  
303030, Орловская обл., г. Мценск, ул. Тургенева, д.196  
E-mail: kostik72@inbox.ru

---

KAPYRIN K.I.

## PROSPECTS AND PROBLEMS OF INDUSTRIAL APPLICATION OF INTENSIVE PLASTIC DEFORMATION: VOLUME DEFORMATION TECHNOLOGIES (based on periodicals)

**Abstract.** The review is devoted to the issues of practical application of severe plastic deformation (SPD) technology in serial production. The methods with volumetric deformation which are of the greatest practical interest and are already capable to become a part of the corresponding technological chains are considered. The approaches to their development are shown. A comparative analysis of grain sizes and mechanical properties is carried out. Examples of specific products obtained by methods of volumetric deformation IPD are given.

**Keywords:** severe plastic deformation, ultrafine grain structure, gradient microstructure, industrial application of SPD.

## BIBLIOGRAPHY

1. R.Z. Valiev, N.A. Krasilnikov, N.K. Tsenev, Plastic deformation of alloys with submicron-grained structure [Tekst] // Materials Science and Engineering: A, 1991, Vol. 137, rr. 35.
2. Bridgman P.W. Effects of High Shearing Stress Combined with High Hydrostatic Pressure [Tekst] // Phys. Rev. 48, 825 – Published 15 November 1935
3. E.O. Hall, The deformation and ageing of mild steel. Discussion of results [Tekst] // Proceedings of the Physical Society of London B, 1951, 64., pp. 747–753.
4. N.G. Petch, The cleavage strength of polycrystals [Tekst] //Journal of Iron & Steel Institute 1953, 174. pp. 25–28.
5. Segal V.M., Reznikov V.I., Kopylov V.I. Processy plasticheskogo strukturoobrazovaniya metallov [Tekst].- Minsk: Nauka i tekhnika, 1994. - 231 s.
6. R.Z. Valiev, Y. Estrin, Z. Horita, T.G. Langdone, M.J. Zehetbauer, Y. Zhu, Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation: ten years later [Tekst] // JOM- The Journal of minerals, metals & materials society, 2016, Vol. 68, No. 4, rr. 1216-1226
7. X. Sauvage, G. Wilde, S. Divinsky, Z. Horita, R.Z. Valiev, Grain boundaries in ultrafine grained materials processed by severe plastic deformation and related phenomena [Tekst] // Materials Science & Engineering A, 2012, Vol. 540, rr. 1-12.
8. F.Z. Utyashev, Nanostrukturirovanie metallicheskikh materialov metodami intensivnoj plasticheskoy deformacii [Tekst] // Fizika i tekhnika vysokih davlenij 2010, tom 20, № 1. s. 7 – 25.

9. P. Frinta, M. Hockauf, T. Halle, G. Strehl, T. Lampke and M.F.-X. Wagner, Microstructural Features and Mechanical Properties after Industrial Scale ECAP of an Al-6060 Alloy [Tekst] // Materials Science Forum (2011), Vol. 667-669, pp. 1153-1158
10. F.Z. Utyashev, Osobennosti intensivnoj plasticheskoy deformacii i strukturoobrazovaniya metalla [Tekst] // Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. Fiziko-matematicheskie nauki № 4-1(182), 2013, s. 204 – 212.
11. Y. Estrin, A. Vinogradov, Extreme grain refinement by severe plastic deformation: a wealth of challenging science [Tekst] // ActaMaterialia. - 2013, 61. rr. 782–817.
12. S.V. Dobatkin, O.V. Rybalchenko, G.I. Raab, Structure formation, phase transformations and properties in Cr-Ni austenitic steel after equal-channel angular pressing and heating [Tekst] // Materials Science & Engineering A, – 2007. – Vol. 463. – P. 41–45.
13. H. Ueno, K. Kakihata, Y. Kaneko, S. Hashimoto, A. Vinogradov, Enhanced fatigue properties of nanostructured austenitic SUS 316L stainless steel [Tekst] // ActaMaterialia. 2011. Vol. 59. rr. 7060-7069.
14. X. Huang, G. Yangb, Y.L. Gao, S.D. Wu, Z.F. Zhang, Influence of processing temperature on the microstructures and tensile properties of 304L stainless steel by ECAPC [Tekst] // Materials Science and Engineering: A. 2008. - Vol. 485. rr. 643–650
15. A. Azushima, R. Kopp, A. Korhonen, D.Y. Yang, F. Micari, G.D. Lahoti, P. Groche, J. Yanagimoto, N. Tsuji, A. Rosochowski, A. Yanagida, Severe plastic deformation (SPD) processes for metals [Tekst] // CIRP Annals - Manufacturing Technology (2008), Vol. 57. rr.716–735.
16. K. Aoki, A. Azushima, Development and properties of high strengthened carbon steels produced by repetitive side extrusion and heat treatment process [Tekst] // Materials Science Forum. 2007. Vol. 539–543. rr.2884–2891.
17. Hussein Naser Radhi, Mohsin Talib Mohammed, Alaa M.H. Aljassani, Influence of ECAP processing on mechanical and wear properties of brass alloy [Tekst] // Materials Today: Proceedings. 2021.- Vol. 44, rr. 2399–2402.
18. Seyed Elias Mousavi, Mahmood Meratian, and Ahmad Rezaeian, Investigation of mechanical properties and fracture surfaces of dual-phase 60–40 brass alloy processed by warm equal-channel angular pressing [Tekst] // Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology: Mater Sci (2017), Vol. 52. rr. 8041–8051
19. M.M. Sadawy, M. Ghanem, Grain refinement of bronze alloy by equal-channel angular pressing (ECAP) and its effect on corrosion behavior [Tekst] // Defence Technology (2016), Vol. 12, rr. 316–323
20. Shiteng Zhao, Chenlu Meng, Fengxin Mao, Weiping Hu, Günter Gottstein, Influence of severe plastic deformation on dynamic strain aging of ultrafine grained Al-Mg alloys // Acta Materialia (2014) Vol. 76, rr. 54–67.
21. M. Prabhakar Bhovi, Deepak C. Patil, S.A. Kori, K. Venkateswarlud, Yi Huange, T.G. Langdone, A comparison of repetitive corrugation and straightening and high-pressure torsion using an Al-Mg-Sc alloy [Tekst] // Journal of materials research technology, (2016), Vol. 5(4), rp. 353–359.
22. Rybalchenko O.V. Vliyanie intensivnoj plasticheskoy deformacii na strukturu, mekhanicheskie i sluzhebnye svojstva stali 08H18N10T / Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk / In-t metallovedeniya im. A.A. Bajkova RAN. Moskva, 2014
23. Salishchev G.A., Valiahmetov O.R., Galeev R.M., Malysheva S.P., Zherebcov S.V., Mironov S.YU., Ivanisenko E.V. Formirovanie submikrokristallicheskoy struktury v titane i titanovyh splavah i ih mekhanicheskie svojstva // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov, 2006, № 2(608), s.19-26.
24. N.G.S. Almeida, P.H.R. Pereira, C.G. de Faria, M.T.P. Aguilar, P.R. Cetlin, Mechanical behavior and microstructures of aluminum processed by low strain amplitude multi-directional confined forging [Tekst] // Journal materials research and technology, 2020, Vol. 9 (3), rp. 3190–3197.
25. Rahul Gupta, Sanjay Srivastava, Nand Kishor Kumar, Sanjay K. Panthi, High leaded tin bronze processing during multi-directional forging: Effect on microstructure and mechanical properties [Tekst] // Materials Science and Engineering: A, (2016), Vol. 654, rp. 282-291.
26. Mulyukov R.R. Razvitie principov polucheniya i issledovaniya ob"emnyh nanostrukturnyh materialov v IPSM RAN // Rossijskie nanotekhnologii, 2007, Tom 2, № 7–8, 38-53.
27. Bejgelzimer YA.E., Synkov S.G., Orlov D.V. Vintovaya ekstruziya [Tekst] // Obrabotka metallov davleniem, 2006, №4, S. 17–22.
28. Y. Bejgelzimer, V. Varyukhin, Twist extrusion [Tekst] // Fizika i tekhnika vysokih davlenij 2014, tom 24, № 2
29. Dmitry Orlov, Yan Bejgelzimer, Sergey Synkov, Viktor Varyukhin, and Zenji Horita, Evolution of Microstructure and Hardness in Pure Al [Tekst] // Materials Transactions, 2008, Vol. 49, №. 1, pp. 2 - 6
30. Dmitry Orlov, Yan Bejgelzimer, Sergey Synkov, Viktor Varyukhin, Nobuhiro Tsuji, and Zenji Horita, Microstructure Evolution in Pure Al Processed with Twist Extrusion [Tekst] // Materials Transactions, 2009, Vol. 50, №. 1, pp. 96 - 100
31. A. Babaei, M.M. Mashhadi, Tubular pure copper grain refining by tube cyclic extrusion-compression (TCEC) as a severe plastic deformation technique [Tekst] // Progress in Natural Science: Materials International, 2014, Vol. 24, rr. 623–630.
32. Do Xuan Truong, Nguyen Manh Tien, Nguyen Manh Hung, Nguyen Truong An, Effect of the cyclic expansion-extrusion process on mechanical properties and the grain refinement of AA6061 aluminum alloy [Tekst] // Journal of Military Science and Technology, 2023, Vol. 87, rr. 100-107.
33. Armin Siahsarani, · Ghader Faraji, Hydrostatic cyclic extrusion compression (HCEC) process; a new CEC counterpart for processing long ultrafine-grained metals [Tekst] // Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2020, Vol. 20:108, rr. 2-13.
34. B. Pasoodeh, V. Alimirzaloo, M. Shahbaz, K. Hajizadeh and J. Alizadeh Kaklar, Strain Distribution for CP-Ti in Cyclic Extrusion Compression Angular Pressing by RSM [Tekst] // Iranian Journal of Materials Forming, 2023, Vol. 10 (3), rr. 25-35.

35. CHukin M.V., Valiev R.Z., Raab G.I., Kopceva N.V., YUfimova YU.YU. Issledovanie evolyucii struktury nanostalej 20 i 45 pri kriticheskikh stepenyah plasticheskoy deformacii // Vestnik MGTU im. G.I. Nosova. – 2007. – №4. – S. 89–93.
36. Utyashev F. Z., Raab G. I., Valitov V. A. Deformacionnoe nanostrukturirovanie metallov i splavov. Monografiya. SPb.: Naukoemkie tekhnologii, 2020. –185 s.
37. Raab G.I., Valiev R.Z. Ravnokanalnoe uglovoe pressovanie po skheme «Konform» dlinnomernykh nanostrukturnykh polufabrikatov iz titana // Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka metallov davleniem. – 2008. – № 1. – S. 21–27.
38. Raab G.I., Valiev R.Z. Poluchenie nanokristallicheskogo titana // Materialovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. 2000. № 9. S. 27–31.
39. R.Z. Valiev, I.P.Semenova., V.V.Latysh., A.VShcherbakov., E.B. Yakushina Ti for biomedical application: new developments Shcherbakov and challenges for commercialization // Nanotechnologies in Russia. 2008. Vol. 3, Nos. 9–10. Pp. 593–601.
40. R.Z. Valiev, I.P. Semenova, V.V. Latysh, H. Rack, T.C Lowe., J. Petruzelka, L. Dluhos, D. Hrusak, J. Sochova Nanostructured titanium for biomedical applications // Advanced Engineering Materials, 2008. 10, v. 8. p. 15–17.
41. V.V. Stolyarov, A.S Ermolenko., D.V. Gunderov, A.G Popov., G.I. Raab, T.Z. Puzanova, R.Z. Valiev, V.S. Gaviko, E.V. Belozerov Equal-Channel Angular Pressing. Microstructure and Hysteresis Properties of Ultrafine-Grained Pr20Fe73.5B5Cu1.5 Alloy // Proc. 8th European Magnetic Materials and Application Conference, Kyiv. Ukraine. 2000. p. 265–268.
42. Patent RF №2266973 Sposob polucheniya ultramelkozernistykh splavov s effektom pamjati formy / Stolyarov V.V., Valiev R.Z., Pushin V.G., Prokofev E.A., Raab G.I., i dr. // opubl. 27.12.2005.
43. Dobatkin C.V., Odesskij P.D., Raab G.I. i dr. Teploe i goryachee ravnokanalnoe uglovoe pressovanie nizkouglerdistykh stalej [Tekst] // Metally. 2004. № 1. S. 105–110
44. Lyakishev N.P., Alymov M.I., Dobatkin S.V. Ob"emnye nanomaterialy konstrukcionnogo naznacheniya [Tekst] // Metally. –2003. – № 3. – S. 3–16.
45. Raab G.I., Raab A.G., Shibakov V.G. Analisis of shear deformation scheme efficiency in plastic structure formation processes [Tekst] // Metalurgija., 2015., Vol.54 (2), pp. 423–425
46. Y.L. He, F. Gao, B.Y. Song, R. Fu, G.M. Wu, J. Li and L. Jiang: Grain Refinement of Magnesium Alloys by CONFORM: A Continuous Severe Plastic Deformation Route? [Tekst] // Material Science Forum, 2012, Vol. 706-709, pp. 1781 – 1786.
47. Xu C., Schroeder S., Berbon P.B. and Langdon T.G. Experimental and numerical analyses of microstructure evolution of Cu-Cr-Zr alloys during severe plastic deformation [Tekst] // Acta Materialia, 2010, Vol. 58, pp. 1379 - 1386.
48. Patent RF №2685842 Sposob izgotovleniya elektrokontaktnogo provoda dlya vysokoskorostnogo zheleznodorozhного transporta // Aksenov D.A., Asfandiyarov R.N., Raab G.I., Raab A.G. Opubl. 23.04.2019.
49. Raab G.I., Valiev R.Z. Ravnokanalnoe uglovoe pressovanie po skheme Sonform dlinnomernykh nanostrukturnykh polufabrikatov iz titana [Tekst] // Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo., 2008., № 1., S. 21–27.
50. Gryadunov I.M., Radchenko S.Yu., Dorokhov D.O., Morrev P.G. Deep hardening of inner cylindrical surface by periodic deep rolling -burnishing process [Tekst] // Modern Applied Science. 2015, Vol. 9, № 9, p. 251-258.
51. Morev P.G., Kapyrin K.I., Radchenko S.YU., Golenkov V.A. Sovremennye problemy tekhnologii IPD (po materialam periodiki) [Tekst] // Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. 2023. № 6 (362). S. 28–43.

### Kapyrin Konstantin Igorovich

Mtsensk Branch «Orel State University», Ph.D.,  
Docent department of the general engineering disciplines  
303030, The Oryol region, Mtsensk, street Turgeneva, 196  
E-mail: kostik72@inbox.ru

© Капырин К.И., 2024

ШОРКИН В.С., ФРОЛЕНКОВА Л.Ю., РОМАШИН С.Н., ХОРОШИЛОВА М.В.,  
КОНИЩЕВА А.И., КРЫГИНА Е.П.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ ТВЕРДОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ВЯЗКОСТЬ ОБТЕКАЮЩЕЙ ЕЕ ЖИДКОСТИ

**Аннотация.** В работе представлена математическая модель влияния твердой поверхности на вязкость обтекающей ее жидкости. Известно, что такое влияние существует из-за установленного для ряда материалов экспериментально наличия поверхностного электрического поля. Предложенная модель описывает это явление теоретически. Приведен пример расчета увеличения поверхностной вязкости воды в кварцевом капилляре. Результат соответствует известным данным.

**Ключевые слова.** Вязкость жидкости, электрическое поле вблизи твердой поверхности, нелокальные потенциальные взаимодействия частиц континуума.

### Введение

При решении краевой задачи о движении вязкой жидкости вдоль твердой поверхности, описываемым, например, уравнениями Навье – Стокса [1], на обтекаемой поверхности для скорости течения обычно выполняется условие прилипания – равенство этой скорости нулю. Исследование поля скоростей, более точное, чем непосредственное наблюдение, показало, что жидкость около самого тела не скользит по нему, а прилипает [2]. Прилипание жидкости было экспериментальным фактом, не подлежащим сомнению. Неразрешенность вопроса о граничном условии на твердой стенке была главным препятствием на пути прогресса в гидродинамике для всех корифеев, начиная от Ньютона и кончая Стоксом и Рэлеем [3]. Даниил Бернуlli сознавал, что реальная жидкость не может свободно скользить по поверхности твердого тела. Этому факту он приписывал определенные большие расхождения между результатами, вычисленными им для идеальной жидкости, и результатами, которые он получил при измерении в реальной жидкости: «Наблюдаются огромные различия, главным образом в части прилипания воды к стенкам трубы; это прилипание заведомо может в некоторых случаях вызывать невероятные эффекты» [4]. Дюбуа [5] пришел к заключению, что в случае, когда средняя скорость воды, текущей в канале, достаточно мала, жидкость, прилегающая к поверхности, находится в покое. В течение XIX столетия различными авторами в разное время были предложены различные гипотезы. Согласно одной из них, скорость у твердой стенки такая же, как скорость самого твердого тела, и изменяется непрерывно в жидкости, которая имеет всюду одинаковые свойства. Вторая гипотеза была сформулирована весьма четко Жираром в дискуссии по поводу его экспериментов с течением жидкостей в трубах. Он предположил, что весьма тонкий слой жидкости остается целиком связанным со стенками. Тогда возникает вопрос об условиях на внешней поверхности этого слоя. Жирар допустил, что остальная жидкость скользит по этому слою. Он предположил также, что в случае, если стенки всюду состоят из одного и того же материала, слой имеет постоянную толщину, так что поверхность слоя представляет для течения те же самые неправильности, как и сами стенки [6]. Он принимал, что эта толщина различна для различных жидкостей или различного материала стенки и что она обращается в нуль в случае жидкостей, которые не смачивают стенки, как, например, для ртути в стеклянных трубках; в таких случаях он предполагал, что жидкость скользит по поверхности [7].

В данной работе делается попытка обоснования совместного выполнения обеих гипотез на основании анализа взаимодействия полярной жидкости с твердой поверхностью, в окрестности которой (согласно результатам исследований, представленных в работах [8, 9]) имеется электростатическое поле, возникшее при образовании поверхностного слоя обтекаемого твердого тела.

## 1 Допущение о механических свойствах жидкости вблизи твердой поверхности

В работах [8, 9] показано, что вблизи поверхности кварцевого капилляра электрическое поле, потенциал  $\varphi$  которого в зависимости с ростом расстояния  $x$  от внутренней стенки капилляра изменяется по закону

$$\varphi = \varphi_0 e^{-kx}, \quad (1)$$

где  $\varphi_0 \approx -400 \text{ мВ} / \text{м}^2$  – примерное значение потенциала на поверхности;

$k \approx 1,1 \cdot 10^9 \text{ 1/м}$  – значение величины обратной эффективной ширины приповерхностного электрического поля.

Причиной существования этого поля можно считать характерный для кварца пьезоэлектрический эффект [10]. В рассматриваемой ситуации он вызывается поверхностным натяжением приповерхностного слоя кварца.

Вода является жидким полярным диэлектриком. Ее молекулы (далее рассматриваются как жесткие микрочастицы  $q_j$ ) обладают массой  $m_j$  и дипольным моментом  $\vec{\delta}_j$ . Для таких микрочастиц-диполей характерно свойство втягиваться в неоднородное электрическое поле в направлении наибольшей величины его потенциала и приобретать ориентацию вдоль нормали к создавшей его поверхности [11].

В работе [12] сделана попытка описания замедления течения вязкой жидкости вблизи твердой поверхности при выполнении условия прилипания по сравнению с течением, на которое стенка не действует, на основании теории микрополярных жидких сред [13]. При этом динамическая вязкость жидкости одна и та же, как у стенки, так и в глубине потока вдали от нее. Замедление течения в этой модели происходит за счет того, что на твердой поверхности условие прилипания распространяется не только на скорость поступательного движения частиц среды, но и на кинематически не зависящую от нее скорость их вращательного движения.

В данной работе вместо модели микрополярной среды используется классическая модель сплошной вязкой жидкости – жидкого континуума  $B$ , состоящего из сплошных макрочастиц  $dB$ , но с таким коэффициентом динамической вязкости  $\eta$ , величина которого определяется потенциальной энергией взаимодействия частиц жидкости с пристеночным электрическим полем.

## 2 Допущение о молекулярных свойствах жидкости и их влиянии на свойства жидкого континуума

Согласно представлениям, изложенным в работах [14, 15], молекула жидкости в течение некоторого времени  $\tau$  колеблется около определенного положения равновесия. Затем под воздействием окружающих частиц она скачком меняет место равновесия, перемещаясь на расстояние порядка размера молекулы. Таким образом, молекулы жидкости как бы делятся на две группы – одна из них газоподобна и совершает беспорядочные перемещения (кочующие молекулы), другая находится в колебательном движении (оседлые молекулы). Оседлые молекулы на короткий отрезок времени  $\tau$  образуют льдоподобные твердые частицы – ассоциаты. Между кочующими и оседлыми молекулами существует динамическое равновесие. При течении жидкости ее молекулы лишь медленно перемещаются, пребывая часть времени около определенных мест, средняя скорость молекул, равная скорости течения, на много меньше скорости их перескоков.

Термодинамические свойства системы микрочастиц  $q_j$  жидкости ( $j$  – номер микрочастицы) определяются с помощью гамильтониана [15], который имеет следующий вид

$$H = \sum_{j=1}^N \left( \frac{\bar{\pi}_j^2}{2m_j} \right) + \Phi_N(\vec{X}_1, \dots, \vec{X}_N), \quad (2)$$

где  $\bar{\pi}_j$  – импульс микрочастицы  $q_j$  с массой  $m_j$ ;

$\Phi_N(\vec{X}_1, \dots, \vec{X}_N)$  – потенциальная энергия (потенциал) взаимодействия всех микрочастиц  $q_j$  системы, расположенных в данный момент времени  $t$  в точках с радиус-векторами  $\vec{X}_j$ .

С учетом (2), вязкость жидкой макрочастицы  $dB$ , образованной системой микрочастиц  $q_j$ , определяется двумя величинами. Первой величиной является изменение их импульса из-за взаимных столкновений в процессе движения внутри одной макрочастицы  $dB$  и из одной макрочастицы в другую. Второй величиной является работа, которая тратится на преодоление сил притяжения между собой и с окружающей средой [14]. Первая величина характеризуется температурой  $T$ , при которой определяется коэффициент динамической вязкости  $\eta$ , а вторая характеризуется энергией активации  $W$ .

В данной работе допущение о молекулярных свойствах жидкости и их влиянии на свойства жидкого континуума состоит в том, что энергия  $W$  является суммой двух слагаемых – энергии  $W_0$  взаимного притяжения между собой микрочастиц  $q_j$ , содержащихся в одном моле жидкости, и прибавки  $\Delta W$  к ней, равной энергии притяжения или отталкивания этих микрочастиц от твердой поверхности.

$$\eta = \eta_* \exp\left(\frac{W}{RT}\right) = \eta_* \exp\left(\frac{W_0 + \Delta W}{RT}\right), \quad (3)$$

где  $\eta_*$  – параметр, определяемый экспериментально или методами теоретической физики;  $R$  – универсальная газовая постоянная.

В случае справедливости этого допущения становится объяснимым то, что в экспериментах по определению зависимости вязкости воды от диаметра кварцевых капилляров она увеличивается. Это происходит за счет увеличения энергии их активации из-за притяжения микрочастицы к поверхности канала, так как при  $\Delta W > 0$  и вязкость у стенки канала больше вязкости вдали от нее, где  $\Delta W = 0$ .

За пределами области действия электрических сил со стороны стенок канала на микрочастицы протекающей жидкости действуют только силы Ван-дер-Ваальса. В работе [16] показано, что для микрочастиц  $q_j$  эти силы являются силами притяжения.

### 3 Нелокальная модель внутренних взаимодействий в твердых континуумах

В работе [17] представлена модель твердого упругого континуума, с помощью которой можно вычислить энергию  $\Delta W$  взаимодействия жидкости с кварцевой твердой поверхностью. Предлагается применить эту модель в предположении о том, что в течение времени  $\tau$  оседлой жизни молекул воды их группы-ассоциаты можно считать твердыми макрочастицами  $dB_{(1)}$  некоторого континуума  $B_{(1)}$ , моделирующего среду ассоциата. Континуум  $B_{(1)}$  взаимодействует посредством нелокальных потенциальных сил с континуумом  $B_{(2)}$ , моделирующим кварц. В конкретных расчетах для воды используются найденные экспериментально [18] модуль сдвига  $G = 3 \text{ Па}$  и объемный модуль упругости  $K = 2,2 \cdot 10^9 \text{ Па}$ . Для кварца: модуль сдвига  $G = 4,3 \cdot 10^{10} \text{ Па}$ , модуль Юнга  $E = 9,4 \cdot 10^{10} \text{ Па}$ .

Для каждого из взаимодействующих континуумов  $B$  допускается, что его потенциальная энергия это потенциальная энергия  $W_B$  системы парных и тройных взаимодействия микрочастиц. Она определяется следующими выражениями

$$W_B = \int_{\Lambda} w \, dV, \quad (4)$$

$$w = \Phi_0^{(1)} \varphi^{(1)} + \Phi_0^{(2)} \int_{\Lambda} \left[ \varphi^{(2)}(\beta l_{(12)}) + \Phi_0^{(3)} \int_{\Lambda} \varphi^{(3)}(\beta l_{(12)}, \beta l_{(13)}) \, dV_3 \right] \, dV_2. \quad (5)$$

Здесь  $w$  – объемная плотность внутренней потенциальной энергии континуума  $B$ . Величины  $\Phi_0^{(1)}$ ,  $\Phi_0^{(2)}$ ,  $\Phi_0^{(3)}$ ,  $\beta$  – материальные параметры. Первый из них является объемной плотностью внутренней потенциальной энергии отдельной макрочастицы, равной потенциальной энергии взаимодействия микрочастиц  $q_j$ , составляющих ее в отсутствии деформации. Величина  $\varphi^{(1)}$  характеризует зависимость этой энергии при деформации. В работе принимается  $\varphi^{(1)}=1$ . Параметры  $\Phi_0^{(2)}$  и  $\Phi_0^{(3)}$  характеризуют «реакцию» континуума на парные и тройные взаимодействия между собой его макрочастиц  $dB \equiv dB_1$  и  $dB_2$  – в первом случае, и  $dB \equiv dB_1$ ,  $dB_2$  и  $dB_3$  – во втором случае соответственно. Параметр  $\beta$  характеризует «скорость» изменения потенциала взаимодействия двух макрочастиц при изменении расстояния  $l_{(12)} = |\vec{l}_{(12)}|$  или  $l_{(13)} = |\vec{l}_{(13)}|$  между ними. Функции  $\varphi^{(2)}(\beta l_{(12)})$  и  $\varphi^{(3)}(\beta l_{(12)}, \beta l_{(13)})$  характеризуют зависимость парных и тройных потенциалов от указанных в скобках межчастичных расстояний. Их вид задается эмпирически. В данной работе считается следующее.

Функция  $\varphi^{(3)}(\beta l_{(12)}, \beta l_{(13)}) \equiv \varphi^{(3)}(\xi_{(12)}, \xi_{(13)})$  представлена в виде произведения:

$$\varphi^{(3)}(\xi_{(12)}, \xi_{(13)}) = \varphi^{(2)}(\xi_{(12)}) \varphi^{(2)}(\xi_{(13)}). \quad (6)$$

Функция  $\varphi^{(2)}(\beta l_{(12)}) \equiv \varphi^{(2)}(\xi_{(12)}) \equiv \varphi^{(2)}(\xi)$  задается в виде:

$$\varphi^{(2)}(\xi) = \begin{cases} \varphi_1(\xi) = \sum_{s=0}^S a_s \xi^s, & 0 \leq \xi \leq \xi_0 \\ \varphi_2(\xi) = e^{-2(\xi - \xi_0)} - 2e^{-(\xi - \xi_0)} & \xi_0 < \xi < \infty; \end{cases}, \quad \zeta_0 \rightarrow 0, \quad (7)$$

где  $a_s$  – коэффициенты, значения и число  $S$  которых определяются условий устойчивости деформированного сплошного бесконечно протяженного материала.

Параметры парных и тройных потенциалов  $\beta$ ,  $\Phi_0^{(2)}$  и  $\Phi_0^{(3)}$  определялись в соответствии с методикой, изложенной в работе [19].

#### 4 Математическая модель для определения энергии притяжения макрочастиц воды к поверхности канала

При моделировании притяжения макрочастиц воды к поверхности предполагается, что два полубесконечных тела  $B_{(1)}$  и  $B_{(2)}$ , контактирующие вдоль плоскости  $A_{(12)}$  подвержены взаимной адгезии. Это означает, что каждая макрочастица  $dB_{(1)1}$  тела  $B_{(1)}$  взаимодействует с каждой макрочастицей  $dB_{(2)1}$  тела  $B_{(2)}$  – при учете парных взаимодействий, и с каждой парой  $dB_{(2)1}$  и  $dB_{(1)2}$  того же тела – при учете тройных взаимодействий, и наоборот. Суммарная энергия адгезии тел  $B_{(1)}$  и  $B_{(2)}$  равна изменению их свободной энергии, произошедшему в изотермическом обратном процессе вступления их в адгезионное взаимодействие. Считается, что если она оказалась положительной, то адгезия есть – тела притягиваются друг к другу. В противном случае адгезии нет. В данной работе используется вариант модели, изложенный в статье [19].

Для упрощения математических рассуждений и повышения наглядности их результатов считается, что силы адгезии со стороны тела  $B_{(2)}$  на частицы  $dB_{(1)} \subset B_{(1)}$

ориентированы перпендикулярно плоскости контакта A<sub>(12)</sub>:  $x \equiv x_{(1)} = x_{(2)} = 0$  тел B<sub>(1)</sub> и B<sub>(2)</sub> и зависят только от расстояния  $x \equiv x_{(1)}$  от поверхности A<sub>(12)</sub>.

В результате вычислений, проведенных для пары твердый кварц – жидккая вода оказалось, что вязкость воды на расстоянии  $x$  от стенки увеличивается в  $\exp[w(x)/(Nk_B T)]$  раз,

$$\text{где } w(x) \cong \varepsilon_0(\varepsilon_r - 1) E_0^2 e^{-2kx} \left[ 0.5 + 1.4 \left( 2e^{-\beta_{(12)}x} - \frac{1}{2} e^{-2\beta_{(12)}x} \right) \right] \quad (8)$$

– зависимость объемной плотности энергии притяжения макрочастиц воды к поверхности кварца;

$E_0$  – напряженность электрического поля на твердой поверхности,  $E_0 = \varphi_0 k = 10^7 \text{ В/м}$

$N \approx 3 \cdot 10^{28}$  – число молекул воды в единице объема;

$k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ ;

$\varepsilon_0 = 8,85418781762039 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ ;

$\varepsilon_r \approx 80$  – относительная диэлектрическая проницаемость воды.

Это соответствует увеличению вязкости воды в кварцевых капиллярах в 1,5 раз, что зафиксировано экспериментально в работе [8].

### Заключение.

В работе представлена математическая модель взаимодействия вязкой полярной жидкости и твердой стенки канала, по которому она протекает. Показано, что в случае, когда канал изготовлен из кварца, вязкость жидкости вблизи его стенки увеличивается. Этот результат подтверждается экспериментально.

*Работа выполнена в ОГУ имени И.С. Тургенева в рамках государственного задания № 075-01466-23-07 на 2023 год и на плановый период 2024 и 2025 годов от 24.11.2023 г., проект № FSGN-2023-002 (1023082800024-8-1.3.2).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М.: Наука, 1974. – 712 с.
- 2 Прандтль Л. Гидро- и аэромеханика. Т. 2. Движение жидкостей с трением и технические приложения / Л. Прандтль, О. Титтенс. – М.-Л.: ОНТИ, 1935. – 283 с.
- 3 Goldstein S. Fluid Mechanics in the First Half of this Century / S. Goldstein // Annual Review of Fluid Mechanics. – Vol. 1. – P. 1 – 28.
- 4 Bernoulli D. Hydrodynamica / D. Bernoulli. – Argentorati, 1738. – P. 59.
- 5 Du Buat. Principes d'Hydraulique / Du Buat. – Paris, 1786. – Vol. 1. – P. 92 – 93.
- 6 Mémoires de la Classe des Sciences Mathématiques et Physiques de l'Institut de France. – 1813, 1814, 1815. – Vol. 14. – P. 254, 324, 329.
- 7 Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de l'Institut de France. – 1816. – Vol. 1. – P. 235, 247, 258.
- 8 Дерягин Б.В. Теория устойчивости коллоидов и тонких пленок / Б.В. Дерягин. – М.: Наука, 1986. – 206 с.
- 9 Чураев Н.В. Поверхностные силы и физикохимия поверхностных явлений / Н.В. Чураев // Успехи химии. – 2004. – Т. 73(1). – С. 26 – 38.
- 10 Смагин А.Г. Пьезоэлектричество кварца и кварцевые резонаторы / А.Г. Смагин, М.И. Ярославский. – М.: Энергия, 1970. – 488 с.
- 11 Sivukhin D.V. General course of Physics. Vol. III. Electricity / D.V. Sivukhin. – M.: FIZMATLIT; MIPT Publishing house, 2002. – 656 p.
- 12 Шоркин В.С. Об одной модели движении жидкости вблизи твердой поверхности / В.С. Шоркин // ПМТФ. 3. – 1981. – С. 70 – 75.
- 13 Eringen A.C. Linear theory of micropolar elasticity / A.C. Eringen // Journal of Mathematics and Mechanics. – 1966. – Vol. 15. – P. 909 – 923. <https://doi.org/10.1512/iumj.1966.15.15060>.
- 14 Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей / Я.И. Френкель. – Л.: Наука, 1975. – С. 221 – 229.
- 15 Крокстон К. Физика жидкого состояния. Статистическое введение / К. Крокстон. – М.: Мир, 1978. 400 с.
- 16 Лифшиц Е.М. Теория межмолекулярных сил притяжения между твердыми телами / Е.М. Лифшиц // Журнал экспериментальной и технической физики. – 1955. – Т. 29. – С. 94 – 110.

17 Shorkin V.S. Linear theory of micropolar media with internal nonlocal potential interactions / V.S. Shorkin, E.N. Vilchevskaya, H. Altenbach // Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik. – 2023. – Vol. 103. – Iss. 11. – e202300099 (2023).  
<https://doi.org/10.1002/zamm.202300099>.

18 Коренченко А.Е. Определение модуля сдвига воды в экспериментах с плавающим диском / А.Е. Коренченко, В.П. Бескачко // ПММ. – 2008. – Т. 49. – №1. – С. 100 – 103.

19 Romashin S.N. Variant of the Relationship between the Mechanical and Adhesive Properties of Solid Materials / S.N. Romashin, V.S. Shorkin // Mechanics of Solids. – 2020. – Vol. 55(8). – P. 1392 – 1405.  
<https://doi.org/10.3103/S0025654420080233>.

**Шоркин Владимир Сергеевич**

ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева», г. Орел  
доктор физико-математических наук, профессор,  
профессор кафедры технической физики и  
математики  
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95  
Тел. +7 (960) 655-00-77  
E-mail: v.s.shorkin@yandex.ru

**Фроленкова Лариса Юрьевна**

ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева», г. Орел  
доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой  
машиностроения,  
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95  
Тел.: + 7 (906) 568-11-18,  
E-mail: Larafrolenkova@yandex.ru

**Ромашин Сергей Николаевич**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел  
кандидат физико-математических наук,  
доцент кафедры технической физики и математики  
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95  
Тел.: +7 (919) 267-71-26,  
E-mail: sromashin@yandex.ru

**Хорошилова Маргарита Вячеславовна**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел  
кандидат технических наук, доцент  
доцент кафедры технической физики и математики  
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95  
Тел.: +7 (910) 747-7078,  
E-mail: hamster08@yandex.ru

**Конищева Алёна Игоревна**

ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева», г. Орел  
студент  
г. Орёл ул. Московская д. 34  
Тел.: +7(920) 725-03-77  
E-mail: konishevaalena123@gmail.com

**Крыгина Елизавета Павловна**

ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева», г. Орел  
студент  
г. Орёл ул. Московская д. 34  
Тел.: +7(910) 205-63-50  
E-mail: kirina090464@mail.ru

---

SHORKIN V.S., FROLENKOVA L.YU., ROMASHIN S.N., KHOROSHILOVA M.V.,  
KONISHEVA A.I., KRYGINA E.P.

**MATHEMATICAL MODEL OF THE INFLUENCE OF A SOLID SURFACE  
ON THE VISCOSITY OF THE FLUID FLOWING AROUND IT**

**Abstract.** The paper presents a mathematical model of the influence of a solid surface on the viscosity of the fluid flowing around it. It is known that such influence exists due to the presence of surface electric field established experimentally for a number of materials. The proposed model describes this phenomenon theoretically. An example of calculation of the increase in surface viscosity of water in a quartz capillary is given. The result corresponds to the known data.

**Keywords:** Fluid viscosity, electric field near a solid surface, and nonlocal potential interactions of continuum particles.

**BIBLIOGRAPHY**

1 SHlihting G. Teoriya pogranichnogo sloya / G. SHlihting. – M.: Nauka, 1974. – 712 s.

2 Prandtl L. Gidro- i aeromechanika. T. 2. Dvizhenie zhidkostej s treniem i tekhnicheskie prilozheniya / L. Prandtl, O. Titens. – M.-L.: ONTI, 1935. – 283 s.

3 Goldstein S. Fluid Mechanics in the First Half of this Century / S. Goldstein // Annual Review of Fluid Mechanics. – 1969. – Vol. 1. – P. 1 – 28.

4 Bernoulli D. Hydrodynamica / D. Bernoulli. – Argentorati, 1738. – P. 59.

5 Du Buat. Principes d'Hydraulique / Du Buat. – Paris, 1786. – Vol. 1. – P. 92 – 93.

6 Mémoires de la Classe des Sciences Mathématiques et Physiques de l'Institut de France. – 1813, 1814, 1815. – Vol. 14. – P. 254, 324, 329.

7 Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de l'Institut de France. – 1816. – Vol. 1. – P. 235, 247, 258.

- 8 Derygin B.V. Teoriya ustojchivosti kolloidov i tonkih plenok / B.V. Derygin. – M.: Nauka, 1986. – 206 s.
- 9 CHuraev N.V. Poverhnostnye sily i fizikohimiya poverhnostnyh yavlenij / N.V. CHuraev // Uspekhi himii. – 2004. – T. 73(1). – S. 26 – 38.
- 10 Smagin A.G. Pezoelektrichestvo kvarca i kvarcevye rezonatory / A.G. Smagin, M.I. YAroslavskij. – M.: Energiya, 1970. – 488 s.
- 11 Sivukhin D.V. General course of Physics. Vol. III. Electricity / D.V. Sivukhin. – M.: FIZMATLIT; MIPT Publishing house, 2002. – 656 p.
- 12 SHorkin V.S. Ob odnoj modeli dvizhenii zhidkosti vblizi tverdoj poverhnosti / V.S. SHorkin // PMTF. 3. – 1981. – S. 70 – 75.
- 13 Eringen A.S. Linear theory of micropolar elasticity / A.S. Eringen // Journal of Mathematics and Mechanics. – 1966. – Vol. 15. – P. 909 – 923. <https://doi.org/10.1512/iumj.1966.15.15060>.
- 14 Frenkel YA.I. Kineticeskaya teoriya zhidkostej / YA.I. Frenkel. – L.: Nauka, 1975. – S. 221– 229.
- 15 Krokston K. Fizika zhidkogo sostoyaniya. Statisticheskoe vvedenie / K. Krokston. – M. Mir, 1978. 400 s.
- 16 Lifshic E.M. Teoriya mezhmolekulyarnyh sil prityazheniya mezhdu tverdymi telami / E.M. Lifshic // ZHurnal eksperimentalnoj i tekhnicheskoj fiziki. – 1955. – T. 29. – S. 94 – 110.
- 17 Shorkin V.S. Linear theory of micropolar media with internal nonlocal potential interactions / V.S. Shorkin, E.N. Vilchevskaya, H. Altenbach // Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik. – 2023. – Vol. 103. – Iss. 11. – e202300099 (2023). <https://doi.org/10.1002/zamm.202300099>.
- 18 Korenchenko A.E. Opredelenie modulya sdviga vody v eksperimentah s plavayushchim diskom / A.E. Korenchenko, V.P. Beskachko // PMM. – 2008. – T. 49. – №1. – S. 100 – 103.
- 19 Romashin S.N. Variant of the Relationship between the Mechanical and Adhesive Properties of Solid Materials / S.N. Romashin, V.S. Shorkin // Mechanics of Solids. – 2020. – Vol. 55(8). – P. 1392 – 1405. <https://doi.org/10.3103/S0025654420080233>.

**Shorkin Vladimir Sergeevich**

Orel State University, Orel  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor,  
Professor of the Department of Technical Physics and  
Mathematics  
302026, Orel, Komsomolskaya st, 95  
Ph.: +7 (960) 655-00-77  
E-mail: v.s.shorkin@yandex.ru

**Romashin Sergey Nikolaevich**

Orel State University, Orel,  
Candidate of Physical and Mathematical Sciences,  
Associate professor of the Department of Technical Physics  
and Mathematics  
302026, Orel, Komsomolskaya st, 95  
Ph.: +7 (919) 267-71-26,  
E-mail: sromashin@yandex.ru

**Konisheva Alena Igorevna**

Orel State University, Orel,  
student  
302026, Orel, Komsomolskaya st, 95  
Ph.: +7(920) 725-03-77  
E-mail: konishevaalena123@gmail.com

**Frolenkova Larisa Yuryevna**

Orel State University, Orel  
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,  
Head of the Department of Mechanical Engineering,  
302026, Orel, Komsomolskaya st, 95  
Ph.: + 7 (906) 568-11-18  
E-mail: Larafrolenkova@yandex.ru

**Khoroshilova Margarita Vyacheslavovna**

Orel State University, Orel,  
Candidate of Physical and Mathematical Sciences,  
Associate professor of the Department of Technical  
Physics and Mathematics  
302026, Orel, Komsomolskaya st, 95  
Ph.: +7 (910) 747-7078,  
E-mail: hamster08@yandex.ru

**Krygina Elizaveta Pavlovna**

Orel State University, Orel,  
student  
302026, Orel, Komsomolskaya st, 95  
Ph.: +7(910) 205-63-50  
E-mail: kirina090464@mail.ru

БАРСУКОВ Г.В., КОЖУС О.Г., ЖУРАВЛЕВА Т.А., СЕМИН А.С., ЧЕРЕПЕНЬКО А.А.

## УПРАВЛЕНИЕ ГИДРОАБРАЗИВНЫМ РЕЗАНИЕМ ПО СИГНАЛАМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ С ПРИВЛЕЧЕНИЕМ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

**Аннотация.** Проблематика статьи связана с получением прецизионных деталей после гидроабразивного резания, за счет корректировки искусственным интеллектом параметров обработки, с помощью цепи обратной связи. Рассмотрены вопросы разработки и обучения искусственной нейронной сети для анализа данных сигнала акустической эмиссии, полученных в процессе гидроабразивного резания, в виде многоэтапного процесса, включающего сбор данных, предобработку, разработку модели, обучение и тестирование.

**Ключевые слова:** гидроабразивное резание, искусственный интеллект, искусственные нейронные сети, акустическая эмиссия, машинное обучение.

### 1. Введение

Необходимость создания высокоточных, надежных машин и приборов, конкурентоспособных в Российской Федерации и на мировом рынке обуславливает необходимость изготовления прецизионных деталей высокой точности и с малыми погрешностями, составляющими единицы микрон, что имеет решающее значение для многих отраслей промышленности [1]. Так, в аэрокосмической промышленности точность имеет первостепенное значение. Гидроабразивная резка (ГАР) используется для придания формы авиационным компонентам из алюминия, титана и композитных материалов [2]. Ее способность вырезать сложные формы с высокой точностью гарантирует идеальную подгонку критически важных деталей друг к другу. В области медицины точность имеет первостепенное значение. ГАР используется для изготовления сложных компонентов медицинских устройств, обеспечивая высочайшее качество. В машиностроении, как правило, применяется для производства заготовок деталей из листового металла, поскольку на гидроабразивном оборудовании есть возможность резания крупных деталей, при этом их последующая механическая обработка не требуется. На гидроабразивной установке можно резать как сверхтвердые сплавы, так и слоистые композиты. В электротехнической промышленности гидроабразивное резание применяется для изготовления печатных плат, корпусов, неметаллических деталей, слюды, стеклотекстолитов, целлюлозы [3, 4].

Проблематика статьи связана с получением прецизионных деталей после ГАР, за счет корректировки искусственным интеллектом (ИИ) обработки, с помощью цепи обратной связи.

Станки для ГАР обеспечивают точность размера до 10 мкм, что во многих случаях сложно выполнить из-за отклонения струи во время обработки. Величина отклонения зависит от скорости подачи сопла, толщины и твердости обрабатываемого материала, вибрации технологической системы, износа сопла, скорости струи и концентрации абразива. Отклонение оси гидроабразивной струи от номинального положения приводит к искажению профиля реза, вследствие чего требуемая равномерность съема, а отсюда и точность обработки могут быть не достигнуты. Особенно важно учитывать отклонение струи при резании по сложной траектории с острыми углами. Когда гидроабразивная струя приближается к углу, необходимо подать управляющий сигнал для замедления скорости подачи, для выравнивания точки входа и выхода, а после выхода из угла постепенно увеличить скорость подачи. Если струя движется по дуге, величина отклонения вызывает искажение контура детали [5]. При этом большая величина отставания приводит к коническому профилю реза, сужающемуся к выходу из материала.

Несмотря на то, что проблеме отклонения гидроабразивной струи во время обработки детали в мировой научной литературе посвящено большое количество работ, не существует моделей совокупного влияния всех факторов на точность обработки. Основная проблема заключается в том, что описание сложного процесса в общей математической постановке невозможно. В ряде работ показано, что ГАР всегда сопровождается излучением сигналов акустической эмиссии (АЭ), которые несут большое количество информации о состоянии

системы резания [6]. Этот метод позволяет непосредственно оценить высокочастотную динамику процесса резания, как средства контроля над формообразованием деталей. Мощное акустическое излучение при ГАР имеет две составляющие: активную и информативную. Активная составляющая способна существенным образом влиять на изменение поврежденности материала детали или контроля, путем реализации механизма малоциклического роста исходных дефектов (микротрещин), инициировать их образование и т.п. При этом возникает информативная составляющая АЭ, обусловленная кинетикой изменения (увеличения, роста) поврежденности. Кроме того, исходная информативная составляющая АЭ – их аппаратурно-регистрируемая часть, позволяет оперативно судить о динамическом, ударно-волновом характере взаимодействия гидроабразивной струи с поверхностью обрабатываемой детали.

Однако в настоящее время нет сведений о взаимосвязи сигналов АЭ с устойчивостью процесса ГАР из-за наличия высокой шумовой составляющей в сигналах.

## 2. Основная часть

Сигналы акустической эмиссии (АЭ) несут большое количество информации о состоянии системы ГАР. Этот метод позволяет непосредственно оценить высокочастотную динамику процесса резания, как средства контроля за отклонением струи во время формообразования детали. Для регистрации и последующего изучения информативных признаков волн АЭ, генерируемых в зоне ГАР возможно применить комплект стандартной многофункциональной исследовательской акустоэмиссионной аппаратуры, например, на базе преобразователя акустической эмиссии SNK-20P.

Диагностическая аппаратура состоит из датчика SNK-20P, блока полосовых фильтров БФ-1. В качестве устройства для регистрации и анализа сигналов АЭ можно применить ЭВМ с соответствующей периферией и программно-математическим обеспечением. Сигнал АЭ полностью оцифровывается отладочной платой на базе микроконтроллера ARM STM32, позволяющей оцифровать уже обработанный сигнал и далее формировать требуемую для дальнейшего анализа в ЭВМ диагностическую информацию. Работа устройства для измерения АЭ заключается в следующем. Волны упругих деформаций от зоны обработки по элементам технологической системы воздействуют на датчик АЭ и преобразуются в электрический маломощный высокочастотный сигнал контактным преобразователем АЭ.

Электрический сигнал усиливается по мощности при помощи малошумящего усилителя, который также служит для согласования электрических характеристик датчика АЭ с последующей аппаратурой. Затем сигнал проходит селекцию по частоте в блоке фильтров, состоящих из фильтров верхних частот (ФВЧ) с частотами среза, например: 30, 60, 100, 200, 400, 500, 750, 1500 кГц, и нижних частот (ФНЧ) с частотами среза: 60, 100, 175, 250, 500, 750, 1200 кГц и направляется в амплитудный дискриминатор, который отделяет полезные сигналы от шумов, за счет введения порога дискриминации по амплитуде. Далее необходимо произвести усиление сигнала до уровня, достаточного для работы анализирующей аппаратуры, при помощи широкополосного усилителя и обработки его по каналам: амплитуды – пиковым детектором, интенсивности – интенсиметром. Затем осуществляется регистрация и оперативный анализ сигнала на ПК. Пиковый детектор служит для интегрирования сигнала по амплитуде и для согласования высокочастотных исследуемых процессов, с относительно низкочастотной регистрирующей аппаратурой. Интенсиметр предназначен для измерения интенсивности N-сигнала (скорости счета) – числа статистически 124 - распределенных импульсов, приведенных к единице времени. В ходе экспериментов измерение параметров волн АЭ, генерируемых в зоне разрушения материала можно регистрировать с помощью преобразователя акустической эмиссии SNK-20P, с минимальными искажениями приема весьма мощных сигналов в широкой полосе частот.

При регистрации параметров АЭ, коэффициент общего усиления сигналов устанавливается в зависимости от мощности регистрируемого сигнала. Заметим, что путем изменения уровня амплитудного дискриминатора можно определять амплитудное распределение сигнала АЭ, позволяющее проводить более детальный анализ энергетического аспекта волн упругой деформации. Выбор наиболее информативного частотного диапазона регистрации параметров АЭ осуществляется на основе предварительных экспериментов. Его нижнюю границу – 60 кГц следует установить из условия отсечки акустических помех, вносимых в полезный сигнал работающей гидроустановки (30-50 кГц). При определении

верхней границы частотного диапазона регистрации 60-1500 кГц параметров АЭ, необходимо исследовать информативность широкого диапазона 60-100 кГц и, в его пределах, более узких частотных диапазонов: 750-1200 кГц; 400-500 кГц; 200-250 кГц; 100-175 кГц.

Частотные диапазоны измерений выбраны из следующих представлений: широкий диапазон обеспечит отстройку акустоэмиссионной аппаратуры от акустических шумов работающего гидроабразивного станка; узкий, низкочастотный диапазон обеспечит регистрацию волн АЭ в относительно низкочастотной области упругих звуковых колебаний; узкий, среднечастотный и высокочастотный диапазоны измерений обеспечивают регистрацию частот в диапазоне 100-250 кГц.

На первом этапе экспериментального изучения волновой динамики доминирующих физических процессов ГАР, будет определяться информативный частотный диапазон измерений амплитуды (A) и интенсивности (N) сигнала АЭ. При фиксированном значении расстояния от среза сопла до обрабатываемого материала L=2 мм, диаметре сопла d = 0,76 мм, давлении p=400 МПа и расхода абразива 400 г/мин, необходимо осуществлять ступенчатое изменение скорости подачи сопла S от 10 до 100 мм/мин. На следующем этапе будет определяться в различных частотных диапазонах относительный параметр (J), характеризующий изменение уровня сигнала АЭ при изменении скорости подачи:

$$J = \frac{\Delta A\dot{E}}{\Delta S}, \quad (1)$$

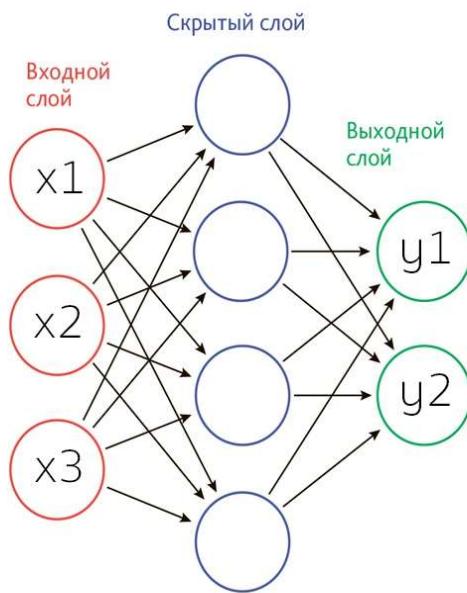
где  $\Delta A\dot{E}$ - изменение уровня регистрируемого параметра АЭ (отн. ед.) при изменении скорости подачи сопла на  $\Delta S$ .

ИНС эффективно обрабатывают сложные и нелинейные данные, какими являются сигналы АЭ. ИНС могут обучаться распознавать определенные паттерны в данных АЭ, которые соответствуют качественным или дефектным условиям резки. Это позволит не только определять текущее состояние процесса, но и предсказывать возможные отклонения от нормы. Перед подачей в ИНС данные АЭ будут подвергаться предварительной обработке, которая включает нормализацию, фильтрацию шумов и другие методы очистки данных. Это улучшает качество данных и увеличивает точность последующего анализа. ИНС настраиваются с учетом специфики задачи. Это включает в себя выбор архитектуры сети (количество слоев, количество нейронов в каждом слое), функции активации и алгоритма обучения. В контексте АЭ можно использовать сети с обратным распространением ошибки, из-за их способности эффективно обучаться на сложных данных. В процессе обучения ИНС будут анализировать большие объемы данных АЭ для выявления закономерностей и зависимостей. Обучение будет продолжаться до тех пор, пока сеть не достигнет приемлемого уровня точности. Таким образом, ИНС будут использоваться для непрерывного мониторинга процесса резки, обеспечивая оперативное обнаружение любых отклонений от нормы и предотвращать от возможных дефектов изделий.

Для создания модели сначала необходимо будет определить, сколько слоев и сколько нейронов в каждом слое сети используется для описания процесса резки. Предлагается использовать на входе два нейрона, а на выходе три (рисунок 1), обозначающих параметры резки (скорость подачи и наклон сопла), а в выходном слое один нейрон представляет соответствующее качество реза (точность).

Однако выбор подходящего количества нейронов в скрытом слое не так прост, поскольку в настоящее время нет определенного правила для его определения, кроме как через экспериментирование. Использование слишком малого количества нейронов ухудшает нейронную сеть и препятствует правильному отображению входных данных на выходные. Использование слишком большого количества нейронов препятствует обобщению и увеличивает время обучения.

В алгоритме методом обратного распространения ошибки (ВР) необходимо осуществить обучение путем повторной подачи всего набора обучающих паттернов (с обновлением весов в конце каждого цикла) до тех пор, пока функции энергии по всем обучающим паттернам не будут минимизированы и не окажутся в пределах установленной точности обучения.



*Рисунок 1 – Схема искусственной нейронной сети*

Процесс обратного распространения ошибки начинается после того, как данные прошли через сеть, и была вычислена ошибка (разница между предсказанным и истинным значением). Ошибка распространяется обратно по сети, начиная с выходного слоя. Во время этого процесса будет проведена корректировка весов сети с целью минимизации ошибки. Это достигается с помощью градиентного спуска или других оптимизационных алгоритмов. Процесс прямого и обратного распространения будет повторяться многократно на множестве обучающих примеров, пока сеть не достигнет желаемой точности или других критериев останова.

Систему мониторинга, использующую датчики для сбора данных об АЭ в процессе ГАР, можно построить на платах разработки ARM STM32. Эти платы предоставляют гибкую и мощную платформу со встроенными аналогово-цифровыми преобразователями (АЦП), которые могут быть эффективно использованы для сбора и предварительной обработки сигналов в реальном времени.

Для коммуникации оборудования следует применить шины UART, SPI или I2C для передачи данных с микроконтроллера на компьютер или сервер для дальнейшей обработки. Для управления сбором данных с датчиков АЭ необходимо разработать специальное программное обеспечение для работы с платой ARM STM32.

Для подготовки исходных данных и разработки начальной архитектуры ИНС можно применить программные пакеты Python с библиотеками Pandas и NumPy, для очистки, нормализации и трансформации данных. Это включает фильтрацию шумов, устранение выбросов и масштабирование данных. Эти инструменты предоставляют мощные и гибкие средства для построения, обучения и валидации нейронных сетей. Использование инструментов, таких как Matplotlib и Seaborn в Python, для визуализации данных и результатов, позволит провести анализ данных и их интерпретацию.

Процесс обучения будет включать настройку весов сети с использованием алгоритмов оптимизации, таких как стохастический градиентный спуск. После обучения модель необходимо подвергнуть тестированию на отдельном наборе данных, чтобы оценить ее эффективность и способность к обобщению.

Обучение ИНС требует значительных вычислительных мощностей, особенно при работе с большими объемами данных. Использование серверов с GPU ускорителем или облачных вычислительных ресурсов позволит значительно ускорить процесс обучения. Использование серверов с GPU (например, серии NVIDIA Tesla или AMD Radeon Pro) для ускорения вычислений, особенно эффективно при работе с глубоким обучением и нейронными сетями.

Таким образом, применение разработанных методов ИИ позволит получить решения для эффективного управления процессов ГАР и обеспечить получение прецизионных деталей.

### Заключение

Разработка модели ИИ для оптимизации гидроабразивного резания — это комплексный процесс, требующий внимательного подхода к выбору методов машинного обучения, подготовке данных и тестированию модели.

Акустическая эмиссия оказывается полезным инструментом для мониторинга и анализа процесса резки в реальном времени. АЭ позволяет идентифицировать особенности процесса, такие как деформация, трещины и эрозия, что важно для контроля качества. Искусственные нейронные сети могут эффективно обрабатывать сложные и нелинейные данные, такие как сигналы АЭ, для выявления закономерностей и предсказания результатов резки. ИНС помогают в оптимизации параметров резки, предсказании качества изделий и предотвращении дефектов.

Использование ИИ в процессах гидроабразивной резки открывает новые возможности для повышения качества и эффективности производства. Развитие и интеграция этих технологий требуют дальнейших исследований и экспериментов, но уже сейчас они демонстрируют значительный потенциал в промышленном применении.

В целом, гидроабразивная резка и сопутствующие технологии ИИ и мониторинга АЭ представляют собой мощные инструменты, способные значительно улучшить процессы обработки материалов. Интеграция этих технологий позволит создать более точные, эффективные и автоматизированные производственные системы, что может значительно повысить эффективность процесса резки, снизить затраты и увеличить продуктивность производства.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барсуков Г.В., Степанов Ю.С., Кожус О.Г., Журавлева Т.А. Оптимизация параметров компонентов оборудования для гидроабразивной резки, обеспечивающая повышение эффективности обработки // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2020. № 3 (341). С. 50-58.
2. Wang Shu, Hu Dong, Yang Fengling, Lin Peng Investigation on kerf taper in abrasive waterjet machining of aluminium alloy 6061-T6. Journal of Materials Research and Technology. 2021. Vol. 15, pp. 427-433
3. Sutowska, Marzena Lukianowicz, Czeslaw Szada-Borzyzkowska, Monika. Sequential Smoothing Treatment of Glass Workpieces Cut by Abrasive Water Jet. Materials. 2020. 15. 6894. doi.org/10.3390/ma15196894.
4. Белов В.А., Вельтищев В.В., Галиновский А.Л., Илюхина А.А., Мугла Д.Р. Экспериментальное определение рациональных параметров элементов струеформирующего тракта установки для подводной гидроабразивной резки материалов // Вестник Брянского государственного технического университета. 2018. № 7 (68). С. 4-12.
5. Степанов Ю.С., Барсуков Г.В., Журавлева Т.А. Обеспечение качества сложноконтурного раскроя деталей из стеклотекстолита гидроабразивной струей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки: научно-технический журнал. – Тула: Изд-во ТГУ, 2016, № 8-2. – С. 235-242. – 343 с.
6. Барзов А.А., Галиновский А.Л., Хафизов М.В., Колпаков В.И. Повышение производительности гидроабразивной резки материалов путем выбора рациональных режимов обработки методом акустической эмиссии // Известия вузов. Машиностроение. 2016. №1 (670).

**Барсуков Геннадий Валерьевич**

Орловский государственный  
университет  
имени И.С. Тургенева,  
доктор технических наук,  
профессор кафедры  
машиностроения  
г. Орёл ул. Московская д. 34  
Тел: +79038806976  
awj@list.ru

**Кожус Ольга Геннадьевна**

Орловский государственный  
университет  
имени И.С. Тургенева,  
кандидат технических наук,  
ведущий инженер отдела  
организационного  
сопровождения НИР  
г. Орёл ул. Наугорское ш. 29  
Тел: +79038806976  
okozhus@mail.ru

**Журавлева Татьяна Александровна**

Калужский филиал МГТУ им. Н.Э.  
Баумана  
Кандидат технических наук  
г. Калуга, ул. Баженова, д. 2.  
Тел.: + 7 (4862) 413295  
E-mail: awj@list.ru

**Семин Александр Сергеевич**

Орловский государственный  
университет  
имени И.С. Тургенева,  
аспирант кафедры  
машиностроения  
г. Орёл ул. Московская д. 34  
Тел: +79038806976  
awj@list.ru

**Черепенько Аркадий Анатольевич**

Орловский государственный университет  
имени И.С. Тургенева,  
доктор технических наук,  
доцент кафедры машиностроения  
г. Орёл ул. Московская д. 34  
Тел: +79038806976  
arkan@nxt.ru

BARSUKOV G.V., KOZHUS O.G., ZHURAVLEVA T.A., SEMIN A.S., CHEREPENKO A.A.

## **WATERJET CUTTING CONTROL BY ACOUSTIC EMISSION SIGNALS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS**

**Abstract.** The article deals with obtaining precision parts after waterjet cutting, by adjusting the processing parameters by artificial intelligence, using a feedback loop. The article considers the issues of developing and training an artificial neural network for analyzing acoustic emission signal data obtained during waterjet cutting, as a multi-stage process, including data collection, preprocessing, model development, training and testing.

**Keywords:** waterjet cutting, artificial intelligence, artificial neural networks, acoustic emission, machine learning.

### **BIBLIOGRAPHY**

1. Barsukov G.V., Stepanov Yu.S., Kozhus O.G., Zhuravleva T.A. Optimization of parameters of equipment components for waterjet cutting, ensuring increased processing efficiency // Fundamental and applied problems of engineering and technology. 2020. No. 3 (341). P. 50-58.
2. Wang Shu, Hu Dong, Yang Fengling, Lin Peng Investigation on kerf taper in abrasive waterjet machining of aluminum alloy 6061-T6. Journal of Materials Research and Technology. 2021. Vol. 15, pp. 427-433
3. Sutowska, Marzena Lukianowicz, Czeslaw Szada-Borzyszkowska, Monika. Sequential Smoothing Treatment of Glass Workpieces Cut by Abrasive Water Jet. Materials. 2020. 15. 6894. doi.org/10.3390/ma15196894.
4. Belov V.A., Veltishchev V.V., Galinovsky A.L., Ilyukhina A.A., Mugla D.R. Experimental determination of rational parameters of the elements of the jet-forming tract of the installation for underwater waterjet cutting of materials // Bulletin of the Bryansk State Technical University. 2018. No. 7 (68). P. 4-12.
5. Stepanov Yu.S., Barsukov G.V., Zhuravleva T.A. Ensuring the quality of complex-contour cutting of fiberglass parts with a waterjet jet // Bulletin of Tula State University. Technical sciences: scientific and technical journal. - Tula: TSU Publishing House, 2016, No. 8-2. - P. 235-242. – 343 p.
6. Barzov A.A., Galinovsky A.L., Khafizov M.V., Kolpakov V.I. Increasing the productivity of waterjet cutting of materials by selecting rational processing modes using the acoustic emission method // News of universities. Mechanical engineering. 2016. No. 1 (670).

**Barsukov Gennady Valерьевич**

Oryol State University  
named after I.S. Turgenev,  
Doctor of Technical Sciences,  
Professor of the Department of  
Mechanical Engineering  
Orel, Moskovskaya str., 34  
+79038806976  
awj@list.ru

**Kozhus Olga Gennadievna**

Oryol State University  
named after I.S. Turgenev,  
Candidate of Technical Sciences,  
Leading Engineer of the Department  
of Organizational Support of  
Research  
Orel, Naugorskoe sh. 29  
+79038806976  
okozhus@mail.ru

**Zhuravleva Tatiana Alexandrovna**

Kaluga Branch of Bauman Moscow  
State Technical University  
Candidate of Technical Sciences,  
Kaluga, Bazhenova str., 2.  
+ 7 (4862) 413295  
E-mail: awj@list.ru

**Semin Alexander Sergeevich**

Oryol State University  
named after I.S. Turgenev,  
postgraduate student of the Department  
of Mechanical Engineering  
Orel, Moskovskaya str., 34  
+79038806976  
awj@list.ru

**Cherepenko Arkady Anatolyevich**

Oryol State University  
named after I.S. Turgenev,  
Doctor of Technical Sciences,  
docent of the Department of  
Mechanical Engineering  
Orel, Moskovskaya str., 34  
+79038806976  
arkan@nxt.ru

© Барсуков Г.В., Кожус О.Г., Журавлева Т.А., Семин А.С., Черепенько А.А., 2024

## **МАШИНОВЕДЕНИЕ И МЕХАТРОНИКА**

УДК 621.822

DOI: 10.33979/2073-7408-2024-368-6-56-64

ШУТИН Д.В., ЛИТОВЧЕНКО М.Г.

### **МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ПОДТВЕРЖДЕНИЯ СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРИБОТРОННЫХ ОПОР РОТОРОВ В РАМКАХ ПРОЦЕДУР ИХ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

**Аннотация.** В статье представлены результаты экспериментальных исследований силовых характеристик триботронных подшипников, геометрические параметры которых были синтезированы с применением оптимизационных алгоритмов на основе численной модели роторно-опорной системы. Дается обоснование проведения косвенной оценки силовых управляющих воздействий, создаваемых активно смазываемыми гидростатодинамическими подшипниками, по высоте гидростатического подъема вала. На основе созданного экспериментального стенда и методики проведения экспериментальных исследований были измерены для четырех спроектированных конфигураций активных подшипников. Анализ полученных результатов позволил подтвердить соотношения заложенных при проектировании силовых характеристик экспериментальных образцов активных опор роторов и, тем самым, обосновать адекватность созданной методики их оптимального проектирования с применением процедур многокритериальной оптимизации.

**Ключевые слова:** триботронная опора, активные подшипники, оптимальное проектирование, физический эксперимент, экспериментальные установки, несущая способность, управляющие воздействия, гидростатический подъем.

#### **1. Введение**

Принцип автоматизированного оптимального проектирования опор роторов подразумевает проведение расчетов, в результате которых будут получены те или иные их конфигурации с заранее заданными свойствами. К их числу может относиться целый ряд интегральных и динамических характеристик проектируемых опорных узлов [1-3].

Для триботронных опор (ТТО), отличающихся наличием системы управления [4,5], требуется учет еще большего количества параметров, чем для традиционных пассивных опор роторов. В первую очередь, требуется учитывать способностью той или иной конфигурации подшипника эффективно воздействовать на режимы работы роторной системы в результате подачи управляющих сигналов. В опорах с активным регулированием параметров подачи смазочного материала [6], в частности, реализуется прямое силовое воздействие на ротор, обеспеченное изменением распределения давлений смазочного материала в смазочном слое. Увеличение максимально возможного силового воздействия расширяет диапазон управляющих воздействий ТТО на роторную систему и рассматривается в качестве одного из критерии проектирования.

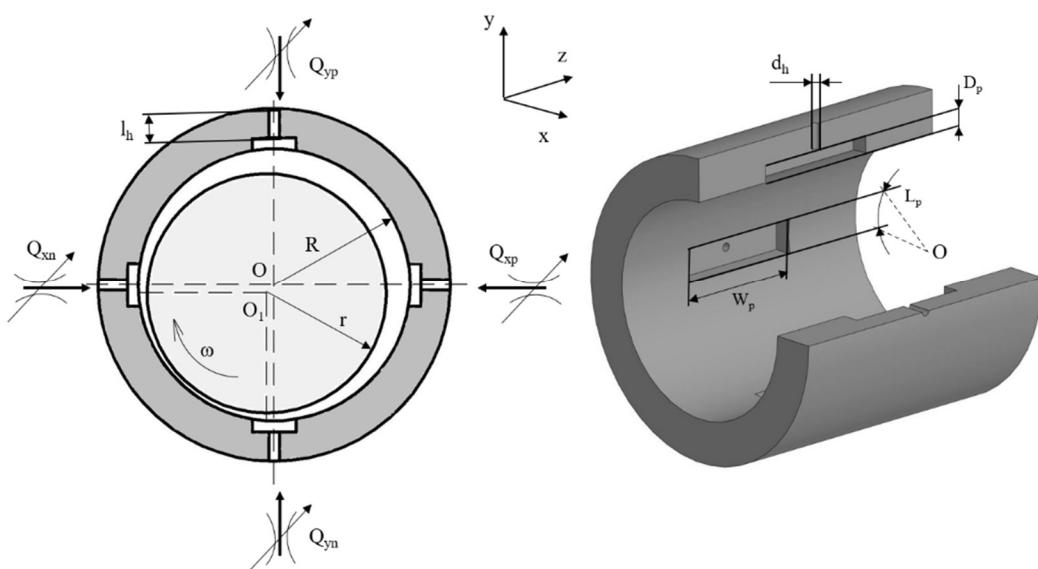
Экспериментальная валидация расчетных результатов является важнейшим этапом в разработке комплексного методического аппарата для решения задач оптимального проектирования, включая упомянутые силовые параметры системы. При этом, подобные процедуры требуют применения специализированного экспериментального оборудования [7-9], а также так методик проведения соответствующих измерений.

Данная работа представляет экспериментальные методики и результаты, полученные в рамках комплексного исследования по созданию методик и прикладных средств параметрического синтеза ТТО [10-12]. В процессе апробации разработанной методологической базы была решена прикладная задача параметрического синтеза гидростатодинамического подшипника жидкостного трения [13] с системой активной смазки. В статье представлена разработанная экспериментальная система и соответствующие методики исследования характеристик, изготовленных образцов активно смазываемых гибридных подшипников. Полученные в ходе экспериментов результаты использованы для

анализа соответствия свойств образцов заданным в ходе проектирования. Сделаны выводы об адекватности разработанной для этого методической и инструментальной базы. Представленная работа, таким образом, является продолжением комплексного исследования методологической и инструментальной базы синтеза и анализа активно управляемых гибридных ТТО [14].

## 2. Цели проведения экспериментальных исследований

В рамках процедуры комплексной апробации методологии оптимального проектирования ТТО были произведены оптимизационные расчеты с применением разработанной модели активного гидростатодинамического подшипника скольжения и модифицированных эвристических алгоритмов [13]. Расчетная схема такого подшипника показана на рисунке 1.



*Рисунок 1 – Расчетная схема активного гидростатодинамического подшипника*

Расчёт модели проводился с учетом использования жёсткого ротора, работающего в докритических частотах и без значительных перекосов в опорах. Модель разработанного активного гидростатодинамического подшипника представляет собой втулку с четырьмя каналами подачи смазочного материала с прямоугольными гидростатическими карманами. В каждом питающем канале давление подачи смазочного материала регулируется с помощью активно управляемых шаровых кранов с электроприводом, создавая регулируемое силовое воздействие на ротор. Несущая способность в такой модели создаётся совокупностью гидростатического и гидродинамического эффектов. Модель использует численное решение модифицированного уравнения Рейнольдса методом конечных разностей [15,16].

Расчетная задача формулировалась при этом таким образом, чтобы получить наборы геометрических параметров таких подшипников с заданными трибологическими и силовыми свойствами. Описание численной модели соответствующей роторно-опорной системы, позволяющей рассчитывать соответствующие характеристики, представлено в [17]. В качестве целевых критериев для решения оптимизационной задачи были выбраны, в частности, момент трения подшипника, длительность переходного процесса и максимальное управляющее силовое воздействие, которое может создать проектируемая опора. Такое воздействие достигается при установлении в противолежащих питающих камерах максимального и минимально возможного давления смазочного материала.

Результаты описанного оптимизационного расчета представляются в виде трехмерного фронта оптимально по Парето решений. Из множества входящих в его состав решений были выбраны четыре отдельных решения, три из которых характеризуются высоким значением двух из трех целевых параметров, а четвертое – сбалансированным сочетанием всех их [13]. Геометрические параметры рассчитанных конфигураций ТТО, а также значения целевых

функций приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры синтезированных конфигураций ТТО.

Параметр	Конф.1	Конф.2	Конф.3	Конф.4
<b>Проектные (целевые) характеристики</b>				
Момент трения $T_{fr}$ , Н·мм	18,1	9,7	10,2	8,7
Длительность переходного процесса $T_{tr}$ , мс	6,5	132	16,4	13,4
Максимальная управляющая сила $R_{max}$ , Н	1010	492	411	127
<b>Конструктивные параметры</b>				
Длина подшипника $L$ , мм	67	34	36,7	30,8
Радиальный зазор $h_0$ , мкм	69	68	67,5	68
Диаметр подводящего канала $d_h$ , мм	0,8	0,93	0,65	0,52
Длина подводящего канала $l_h$ , мм	12,5	12,4	12,2	13,3
Ширина питающего кармана $W_p$ , % от $L$	58	52,7	55,5	51
Ширина питающего кармана, мм	40,6	18,5	20	14,9
Глубина питающего кармана, мм	1,5			
Окружная протяженность питающего кармана $L_p$ , градусов	18,8	19,7	18,7	11,65

Конфигурация 1 отличается хорошей динамической устойчивостью и управляемостью; конфигурация 2 имеет средние показатели трения и управляемости, но плохими динамическими характеристиками; конфигурация 4, напротив, имеет низкое трение, но плохую управляемость. Вариант 3 отличается сбалансированным сочетанием рассмотренных целевых параметров. Для всех конфигураций глубина гидростатического кармана составила 1,5 мм и выбиралась исходя из обеспечения баланса между факторами равномерности распределения давления смазочного материала по площади кармана и турбулизации течений в нем, которые возрастают с увеличением глубины.

С целью аprobации предложенных в предыдущих работах авторов методик и их уточнения был разработан экспериментальный комплекс, описанный в следующем разделе. Базовые методики экспериментальной оценки характеристик спроектированных подшипников представлены в [14].

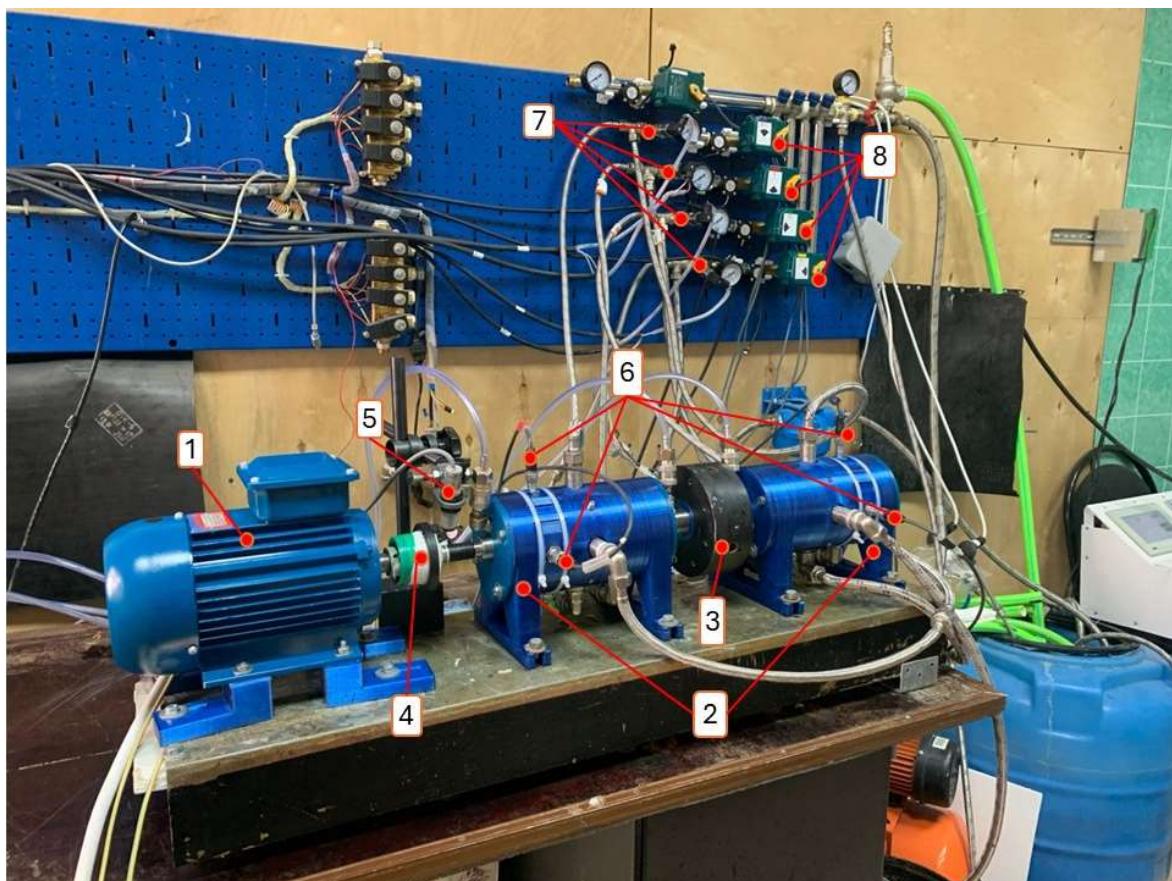
### 3. Описание экспериментального комплекса

В рамках данного исследования был спроектирован и собран стенд для оценки комплекса силовых и трибологических характеристик ТТО (рисунок 2). Он включает в себя двигатель, ротор, опирающийся на 2 гидростатодинамические опоры, смазываемые водой и нагружочный диск. Диаметр цапф вала составляет 40 мм, масса ротора в сборе с нагружочным диском равна 9 кг. Конструкция установки также обеспечивает равное распределение веса ротора между двумя его опорами.

Основными задачами, выполненными при помощи данного экспериментального стенда, являлись оценка длительности переходного процесса в ответ на импульсное силовое воздействие на ротор, оценка максимального управляющего воздействия, развиваемого ТТО и оценка момента трения в ТТО. Особенностью данного стенда является использование модального молотка Global Test AU002 с датчиком силы Global Test AC21 для оценки величины импульса силы, прикладываемого к ротору. Максимальное управляющее воздействие оценивалось в гидростатическом режиме (без вращения ротора) косвенно путем определения величины всплытия ротора приложении в подшипниковых узлах максимального давления верхней камере и минимального давления в горизонтальных и нижней камерах. Управление давлением осуществлялось при помощи управляемой системы «управляемый кран-датчик давления» с обратной связью, которая осуществляла контроль давления подачи в непосредственной близости от канала подачи смазочного материала [6].

В экспериментальном стенде используются бесконтактные воздушные уплотнения, что уменьшает общий момент трения трибоузла. Система подачи смазочного материала в

подшипниковые узлы реализована четырьмя раздельными каналами, что позволяет регулировать давление в них независимым образом. Особенностью стенда также является наличие разъёмной муфты для оценки момента трения в ТТО по параметрам свободного выбега вала.



**Рисунок 2 – Экспериментальный стенд для исследования динамических характеристик роторных систем на ТТО:** 1 – электродвигатель; 2 – подшипниковые узлы с гидростатодинамическими подшипниками; 3 – нагрузочный диск; 4 – разъёмная муфта; 5 – тахометр; 6 – датчики приближения; 7 – датчики давления; 8 – активно управляемые шаровые краны

В составе информационно-измерительной системы используются индуктивные датчики виброперемещения. Согласно стандартам измерения вибрации в промышленной технике такой тип сенсоров применим [18].

Для измерения величины всплытия для косвенной оценки максимального управляющего воздействия помимо модального молотка с датчиком силы используется система с обратной связью, состоящая из шарового крана с электродвигателем и датчиком избыточного давления и размещенная на каждом питающем канале. Регулирование системой производится с помощью платы Arduino UNO с контроллером ATmega328, уставка задается в интерфейсе LabView и передается на контроллер с ЦАП-преобразователя NI 9269. Тахометр ОВЕН TX01 используется для контроля частоты вращения при оценке момента трения в подшипниковых узлах.

#### 4. Методика измерения и результаты

Исследование максимального управляющего воздействия, которое может реализовать управляемая опора, производилось косвенным путем ввиду затруднительности прямого измерения максимальной силы, развиваемой опорным узлом. Величина такого воздействия оценивалась по максимальному подъему цапфы вала, когда система управления опоры создает максимальное управляющее воздействие в вертикальном направлении благодаря наличию гидростатического эффекта. Измерения производились без вращения вала во избежание негативного влияния сил дисбаланса и гидродинамических сил на получаемые результаты.

Поскольку при данном измерении фиксируется установившееся положение вала, развиваемая при этом сила гидростатического подъема оказывается равна весу ротора, приходящемуся на опору, а величина подъема характеризует запас по величине управляющего воздействия.

В базовой рабочей конфигурации активной гидростатодинамической опоры давление подачи смазочного материала во всех смазочных каналах устанавливается равным  $p_0=0,2$  МПа. Данное состояние системы рассматривается как основное рабочее, а положение вала по вертикальной оси считается рабочим подъемом  $H$ .

Для оценки развиваемого некоторой конфигурацией подшипника подъемной силы, действующей на вал, согласно разработанной методике, в первую очередь давление подачи смазочного материала в верхнюю питающую камеру, которое препятствует достижению максимального гидростатического подъема вала, снижается до минимального ( $p_{min}=0$  МПа). При этом в камерах, расположенных по горизонтальной оси, давление устанавливается равным  $p_0=0,2$  МПа, обеспечивая при этом центрированное положение вала по горизонтальной оси. Измеряемая величина гидростатического подъема  $H_2$ , отнесенная к характерному размеру подшипника, а именно начальному зазору  $h_0$ , характеризует наибольшую создаваемую подшипником управляющую силу.

Также в методику измерений был дополнительно включен режим, при котором давление в нижней питающей камере устанавливается равным максимально возможному для смазочной системы ( $p_{max}=0,3$  МПа), а в верхней также остается минимальным, как и в описанном ранее опыте. Измеренная таким образом величина подъема вала  $H_3$  позволяет более комплексно оценить способность подшипника создавать управляющие силовые воздействия, в первую очередь для конфигураций с наименьшими показателями силового воздействия на вал, где разница между величинами  $H$  и  $H_2$  может оказаться недостаточно существенной для обеспечения достоверности анализа.

В таблице 2 представлены результаты измерений для всех рассмотренных конфигураций ТТО, а также соответствующие расчетные значения, полученные с использованием имитационной модели роторно-опорной системы.

Таблица 2 – Экспериментально полученные значения гидростатического подъема вала в ТТО при различных конфигурациях

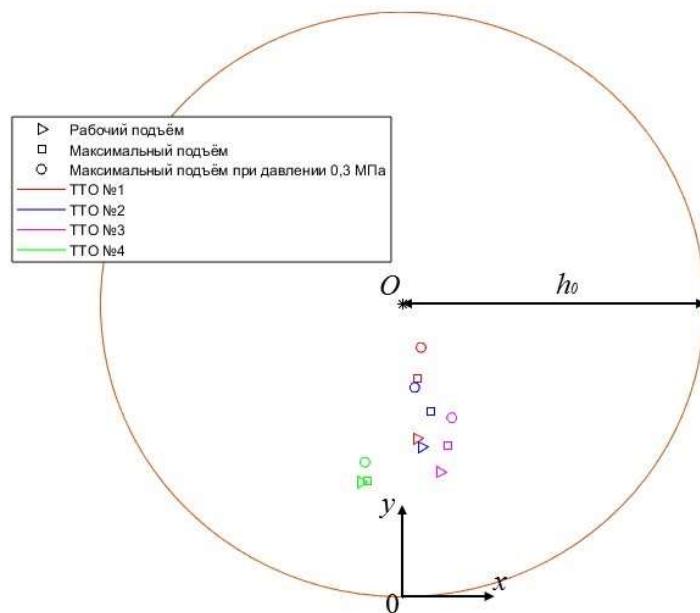
№ конфигурации ТТО	Рабочий подъем $H$ , мкм	Наибольший подъем ( $p_{max}=0,2$ МПа), $H_2$ , мкм	Наибольший подъем ( $p_{max}=0,3$ МПа), $H_3$ , мкм
1	59,786	68,235	43,235
2	50,616	57,285	40,923
3	41,555	49	34,667
4	31,74	36,834	31,384

Необходимо отметить, что фактическая величина радиального зазора  $h_0$  для изготовленных образцов ТТО с учетом технологических допусков и погрешностей изготовления вала и подшипников составляет, согласно результатам измерений,  $80\pm3$  мкм. Поэтому значение данного параметра с целью дальнейшего анализа для всех конфигураций ТТО было принято  $h_0 = 80$  мкм. С учетом данного фактора, экспериментальные результаты измерения величин подъема вала также представлены в графическом виде на рисунке 3, где соответствующие положения сопоставлены с диапазоном возможных перемещений центра вала в зазорах протестированных подшипников.

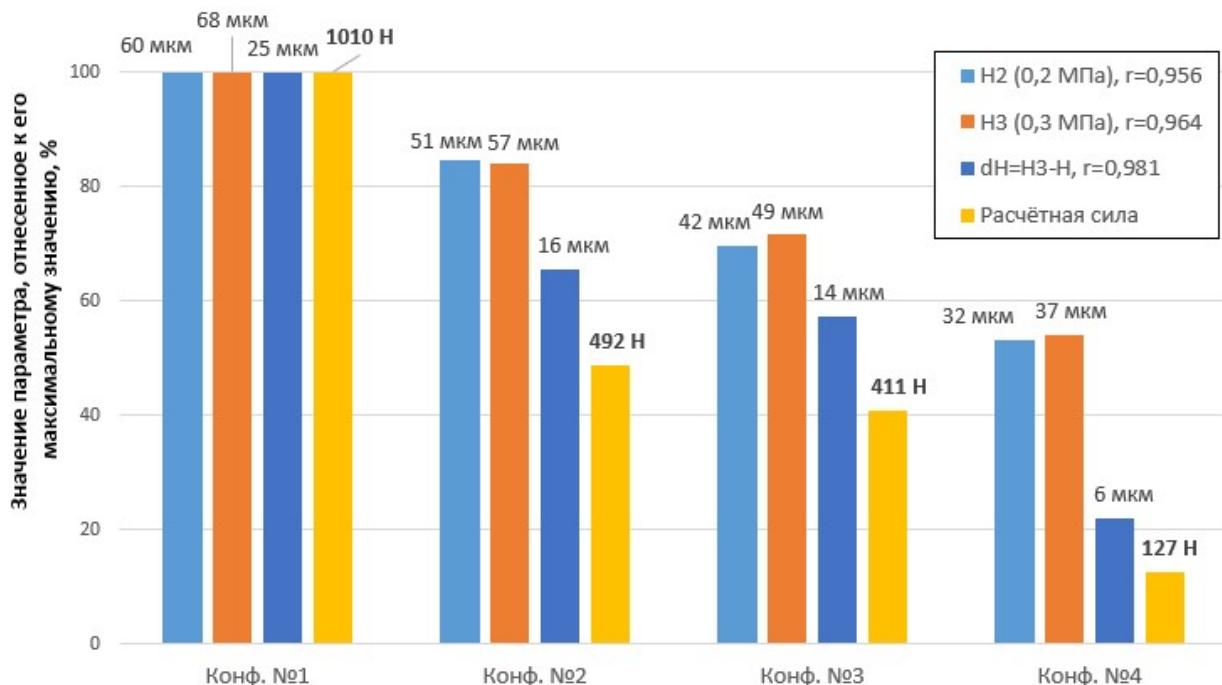
Полученные результаты отражают тенденцию к подъему вала в вертикальном направлении при изменениях комбинаций управляющих давлений в питающих каналах ТТО, приводящих к повышению гидростатической подъемной силы. Незначительные расхождения в положениях вала по горизонтальной оси  $X$  вызваны, в первую очередь, погрешностью средств и методов измерения, величина такой погрешности не оказывает существенного влияния на качество полученных данных.

Для проведения ключевых этапов анализа была построена диаграмма, представленная

на рисунке 4, сопоставляющая величины расчётной управляющей силы и параметры гидростатического подъема вала в рассмотренных конфигурациях ТТО.



**Рисунок 3 – Положение центров вала в протестированных конфигурациях ТТО при различных комбинациях управляющих давлений в питающих каналах**



**Рисунок 4 – Сопоставление максимальной управляющей силы в исследуемых ТТО с экспериментальными значениями параметров гидростатического подъема вала**

Ввиду разнородности сопоставляемых физических величин, их значения были предварительно нормированы соотнесением с максимальным значением каждого из параметров в рассматриваемой выборке. В качестве количественной метрики оценки результатов сопоставления был использован коэффициент корреляции, значения которого приведены в легенде рисунка 4, а расчетная формула имеет вид:

$$r = \frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\sum(x-\bar{x})^2 \sum(y-\bar{y})^2}}, \quad (1)$$

где  $x$  и  $y$  – сопоставляемые величины, а  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$  – их средние значения по рассматриваемой выборке.

Результаты анализа показывают положительную корреляцию для всех рассмотренных комбинаций, однако в наибольшей степени коррелирует с расчетным значением максимальной управляющей силы разница между высотой рабочего подъема  $H$  и максимального подъема  $H_3$ , значение коэффициента корреляции составляет  $r=0,981$ . Из полученных данных можно сделать вывод о наличии однозначной взаимосвязи между данными параметрами, а характер такой взаимосвязи близок к линейному.

Полученные результаты, таким образом, позволяют подтвердить заложенные при автоматизированном проектировании рассмотренных образцов активных гидростатодинамических опор силовые характеристики. Разница между величиной рабочего и максимального гидростатического подъема вала на спроектированных подшипниках может выступать в качестве меры количественной и качественной оценки способности спроектированной конфигурации ТТО оказывать силовые управляющие воздействия на вал. В целом же, результаты позволяют сделать вывод, что разработанная методика проектирования триботронных опор роторов позволяет обеспечивать заданные свойства в части силовых параметров целевых роторно-опорных систем.

### 5. Выводы

В ходе исследования был спроектирован экспериментальный комплекс для исследования интегральных и динамических характеристик роторных систем с триботронными опорами жидкостного трения. Проведенный комплекс экспериментальных исследований спроектированных активно смазываемых гибридных опор позволил дать оценку фактическим значениям тех параметров, которые задавались в процессе их проектирования в качестве целевых функций, в частности, максимальной управляющей силы воздействия на вал со стороны активного подшипника. Согласно разработанной экспериментальной методике, были собраны данные о величине гидростатического подъема вала в исследованных конфигурациях опорных узлов. Анализ показал наличие однозначной связи между максимальной управляющей силой в подшипнике и разницей между базовой и максимальной величиной гидростатического подъема вала с коэффициентом корреляции  $r=0,981$ . Таким образом, полученные результаты подтвердили заданные при проектировании силовые характеристики экспериментальных образцов активных гидростатодинамических подшипников. Кроме того, результаты позволяют также в целом обосновать адекватность разработанной методики автоматизированного проектирования триботронных опор роторов с заданными свойствами в части их силовых параметров.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00789, <https://rscf.ru/project/22-19-00789/>.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Saruhan H. Optimum design of rotor-bearing system stability performance comparing an evolutionary algorithm versus a conventional method // International Journal of Mechanical Sciences. - 2006. – Vol. 48. - p. 1341-1351.
2. Lu K., Jin Yu., Chen Yu., Yang Y., Hou L., Zhang Z., Li Z., Fu Ch. Review for order reduction based on proper orthogonal decomposition and outlooks of applications in mechanical systems // Mechanical Systems and Signal Processing. - 2019. – Vol. 123. - p. 264-297.
3. Lu K., Jin Yu., Huang P., Zhang F., Zhang H., Fu Ch., Chen Yu. The applications of POD method in dual rotor-bearing systems with coupling misalignment // Mechanical Systems and Signal Processing. - 2021. – Vol.150. – 107236.
4. Li S., Babin A., Shutin D., Kazakov Yu., Liu Y., Chen Z., Savin L. Active Hybrid Journal Bearings with Lubrication Control: Towards Machine Learning // Tribology International. - 2022. – Vol.175. – 107805.
5. Wang, Nenzi, Ho, Chang-Li, Cha, Kuo-Chiang Engineering Optimum Design of Fluid-Film Lubricated Bearings. TRIBOLOGY TRANSACTIONS. – 2000. – Vol.43. p. 377-386.
6. М.Г. Литовченко Программно-аппаратная система полуактивной смазки триботронных опор жидкостного трения / М.Г. Литовченко, Д.В. Шутин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2024. - №3 (365). С. 68-76.
7. Патент № 2734174 C1 Российская Федерация, МПК F16C 19/00, F16C 19/52, G01M 13/04. мехатронный подшипник качения: № 2019142066: заявл. 16.12.2019: опубл. 13.10.2020 / А. Ю. Родичев, А. В. Горин, Р. Н.

Поляков [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева" (ОГУ им. И.С. Тургенева). – EDN UJRABD.

8. Патент № 2734066 С1 Российская Федерация, МПК G01M 13/04. Установка для исследования роторных систем с активным управлением: № 2019142068: заявл. 16.12.2019: опубл. 12.10.2020 / А. В. Корнаев, А. Ю. Родичев, Л. А. Савин; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования " Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева " (ОГУ им. И.С. Тургенева). – EDN XKYYHC.

9. Патент № 2733996 С1 Российская Федерация, МПК G01M 13/04. Установка для исследования роторных систем с многозонной подачей смазочного материала: № 2019142067: заявл. 16.12.2019: опубл. 09.10.2020 / Е. П. Корнаева, А. Ю. Родичев, А. С. Фетисов, Ю. Н. Казаков; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "ОРЛОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени И.С. ТУРГЕНЕВА" (ОГУ им. И.С. Тургенева). – EDN XAHOTM.

10. А.С. Фетисов Генетические алгоритмы для оптимального проектирования триботронных опор роторов / А.С. Фетисов, М.Г. Литовченко, Д.В. Шутин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологий. – 2023. - №4 (360). – С. 230-240.

11. Shutin, Denis, Fetisov, Alexander, Savin, Leonid Optimization of Journal Bearings Considering Their Adjustable Design and Rotor Dynamics. – 2023. - 10.1007/978-3-031-40459-7\_24.

12. А.С. Фетисов Многокритериальная оптимизация активных гибридных подшипников скольжения / А.С. Фетисов, М.Г. Литовченко, Д.В. Шутин // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2024. – №28 (1). – С. 8-26.

13. A. Fetisov Application of evolutionary algorithms to the optimal design of non-circular actively lubricated bearings / Fetisov A., Litovchenko M., Shutin D // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2024. – 11 C. 68-76.

14. А.С. Фетисов Экспериментальная оценка характеристик триботронных опор роторов / А.С. Фетисов, А.Ю. Родичев, М.Г. Литовченко, Д.В. Шутин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологий. – 2024. - №1 (363). С. 52-59.

15. W.M. Dmochowski Difference Method for Fluid-Film Bearings / W.M. Dmochowski, A. Dadouche, M. Fillon // Encyclopedia of Tribology. – 2013. – pp 1137-1143.

16. L. San Andres Experimental identification of bearing force coefficients. – 2009.

17. D. Shutin Optimization of journal bearings considering their adjustable design and rotor dynamics / D. Shutin, A. Fetisov, L. Savin // Proceedings of the 11<sup>th</sup> IFToMM International Conference on Rotordynamics. IFToMM 2023. Mechanisms and machine science. Springer. – 2023. – №2(140). – pp. 364-376.

18. Mechanical vibration — Vibration of rotating machinery equipped with active magnetic bearings. - ISO 14839-1:2018. – 22 P.

**Шутин Денис Владимирович**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел  
Доцент кафедры мехатроники, механики и  
робототехники, канд. техн. наук  
E-mail: rover.ru@gmail.com

**Литовченко Максим Геннадьевич**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел  
Студент кафедры мехатроники, механики и  
робототехники  
E-mail: yamaks123@bk.ru

---

SHUTIN D.V., LTOVCHENKO M.G.

**METHOD AND RESULTS OF EXPERIMENTAL VERIFICATION  
OF POWER CHARACTERISTICS OF TRIBOTRONIC ROTOR SUPPORTS  
WITHIN THE FRAMEWORK OF THEIR OPTIMAL DESIGN**

**Abstract.** The article presents the results of experimental studies of the power characteristics of tribotron bearings, the geometric parameters of which were synthesized using optimization algorithms based on a numerical model of the rotor-support system. The rationale for indirectly assessing the power control effects created by actively lubricated hydrostatic-dynamic bearings is given, based on the height of the hydrostatic shaft lift. Based on the created experimental stand and the methodology for conducting experimental studies, measurements were made for four designed configurations of active bearings. The analysis of the obtained results made it possible to confirm the relationships between the power characteristics of the experimental samples of active rotor supports laid down in the design and, thereby, to justify the adequacy of the created methodology for their optimal design using multi-criteria optimization procedures.

**Keywords:** tribotronic support, active bearings, optimal design, physical experiment, experimental setups, bearing capacity, control actions, hydrostatic lift.

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Saruhan H. Optimum design of rotor-bearing system stability performance comparing an evolutionary algorithm versus a conventional method // International Journal of Mechanical Sciences. - 2006. - Vol. 48. - p. 1341-1351.
2. Lu K., Jin Yu., Chen Yu., Yang Y., Hou L., Zhang Z., Li Z., Fu Ch. Review for order reduction based on proper orthogonal decomposition and outlooks of applications in mechanical systems // Mechanical Systems and Signal Processing. - 2019. - Vol. 123. - p. 264-297.
3. Lu K., Jin Yu., Huang P., Zhang F., Zhang H., Fu Ch., Chen Yu. The applications of POD method in dual rotor-bearing systems with coupling misalignment // Mechanical Systems and Signal Processing. - 2021. - Vol.150. - 107236.
4. Li S., Babin A., Shutin D., Kazakov Yu., Liu Y., Chen Z., Savin L. Active Hybrid Journal Bearings with Lubrication Control: Towards Machine Learning // Tribology International. - 2022. - Vol.175. - 107805.
5. Wang, Nenzi, Ho, Chang-Li, Cha, Kuo-Chiang Engineering Optimum Design of Fluid-Film Lubricated Bearings. TRIBOLOGY TRANSACTIONS. - 2000. - Vol.43. p. 377-386.
6. M.G. Litovchenko Software and hardware system of semi-active lubrication tribotronic fluid friction supports / M.G. Litovchenko, D.V. Shutin // Fundamental and applied problems of engineering and technology. - 2024. - №3 (365). - pp. 68-76.
7. Patent No. 2734174 C1 Russian Federation, IPC F16C 19/00, F16C 19/52, G01M 13/04. mechatronic rolling bearing: No. 2019142066: appl. 12/16/2019: publ. 10/13/2020 / A. Yu. Rodichev, A. V. Gorin, R. N. Polyakov [etc.]; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Oryol State University named after I.S. Turgenev" (OSU named after I.S. Turgenev). - EDN UJRABD.
8. Patent No. 2734066 C1 Russian Federation, IPC G01M 13/04. Installation for studying rotor systems with active control: No. 2019142068: application. 12/16/2019: publ. 10/12/2020 / A. V. Kornaev, A. Yu. Rodichev, L. A. Savin; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Oryol State University named after I.S. Turgenev" (OSU named after I.S. Turgenev). -EDN XKYYHC.
9. Patent No. 2733996 C1 Russian Federation, IPC G01M 13/04. Installation for studying rotor systems with multi-zone lubricant supply: No. 2019142067: application. 12/16/2019: publ. 10/09/2020 / E. P. Kornaeva, A. Yu. Rodichev, A. S. Fetisov, Yu. N. Kazakov; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "ORYOL STATE UNIVERSITY NAMED AFTER I.S. TURGENEV" (OSU named after I.S. Turgenev). -EDN XAHOTM.
10. A.S. Fetisov Genetic algorithms for the optimal design of tribotronic rotor supports / A.S. Fetisov, M.G. Litovchenko, D.V. Shutin // Fundamental and applied problems of engineering and technology. - 2023. - No. 4 (360). - pp. 230-240.
11. Shutin, Denis, Fetisov, Alexander, Savin, Leonid Optimization of Journal Bearings Considering Their Adjustable Design and Rotor Dynamics. - 2023. - 10.1007/978-3-031-40459-7\_24.
12. A.S. Fetisov Multi-objective optimization of active hybrid fluid film bearings using heuristic algorithms / A.S. Fetisov, M.G. Litovchenko, D.V. Shutin // Proceedings of the Southwest State University. - 2024. - № 28 (1). - pp. 8-26.
13. A. Fetisov Application of evolutionary algorithms to the optimal design of non-circular actively lubricated bearings / Fetisov A., Litovchenko M., Shutin D // Lecture Notes in Networks and Systems. - 2024. - 11 C.
14. A.S. Fetisov Experimental estimation of characteristics tribotronic rotor supports / A.S. Fetisov, A. Yu. Rodichev, M.G. Litovchenko, D.V. Shutin // Fundamental and applied problems of engineering and technology. - 2024. - №1 (363). - pp 52-59.
15. W.M. Dmochowski Difference Method for Fluid-Film Bearings / W.M. Dmochowski, A. Dadouche, M. Fillon // Encyclopedia of Tribology. - 2013. - pp 1137-1143.
16. L. San Andres Experimental identification of bearing force coefficients. - 2009.
17. D. Shutin Optimization of journal bearings considering their adjustable design and rotor dynamics / D. Shutin, A. Fetisov, L. Savin // Proceedings of the 11<sup>th</sup> IFToMM International Conference on Rotordynamics. IFToMM 2023. Mechanisms and machine science. Springer. - 2023. - №2(140). - pp. 364-376.
18. Mechanical vibration — Vibration of rotating machinery equipped with active magnetic bearings. - ISO 14839-1:2018. - 22 P.

**Shutin Denis Vladimirovich**  
Orel State University,  
Associate Professor of the Department of Mechatronics,  
Mechanics and Robotics, Ph.D.  
E-mail: rover.ru@gmail.com

**Litovchenko Maksim Gennadievich**  
Orel State University  
Student of the Department of Mechatronics, Mechanics  
and Robotics  
E-mail: yamaks123@bk.ru

ВНУКОВ А.В., РОДИЧЕВ А.Ю., ПРЕСНЕЦОВА В.Ю., РОДИЧЕВА И.В., ВАСИЛЬЕВ К.В.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА РАСХОД ВОЗДУХА В БЕСКОНТАКТНОМ УПЛОТНЕНИИ

**Аннотация.** Материал статьи содержит исследование влияния конструктивных и технологических факторов на расход воздуха в бесконтактном уплотнении. Авторами проведено аналитическое исследование состояния вопроса использования бесконтактных уплотнений, рассмотрены проблемы и способы их решения. В статье описана экспериментальная установка с исследуемым модулем, содержащим бесконтактное уплотнение, также приведена методика и результаты расчета проведенного многофакторного эксперимента. Установлена и описана зависимость расхода воздуха, проходящего через экспериментальный узел с бесконтактным уплотнением от различных факторов.

**Ключевые слова:** бесконтактное уплотнение, полнофакторный эксперимент, давление, зазор, расход воздуха.

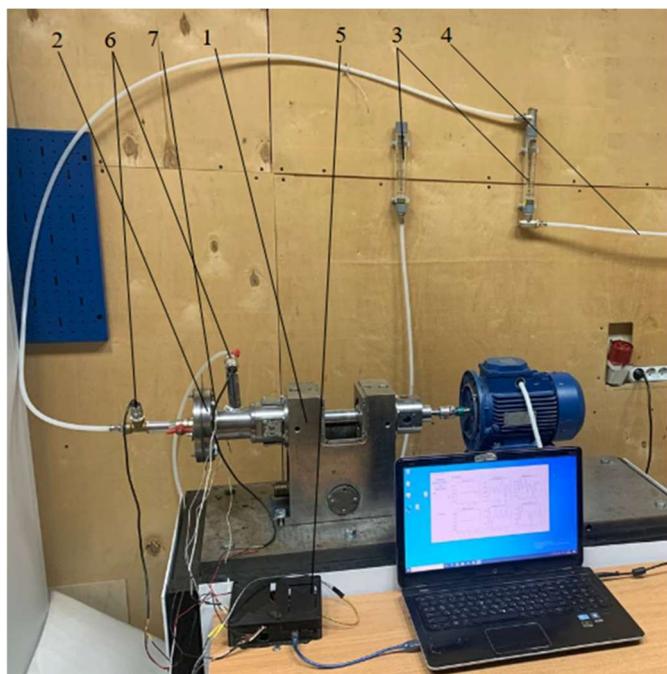
### Введение

Использование пальчиковых уплотнений демонстрирует значительные преимущества по сравнению с традиционными лабиринтными уплотнениями. Эти уплотнения обладают лучшими герметизирующими свойствами, что позволяет снизить утечки рабочей среды на 1–2%, что, в свою очередь, приводит к уменьшению удельного расхода топлива на 0,7–1,4% и прямых эксплуатационных издержек на 0,35 – 0,7%. Пальчиковые уплотнения также отличаются технологичностью конструкции и низкой себестоимостью изготовления по сравнению с щёточными уплотнениями. Они способны компенсировать вибрации, температурное расширение и отклонения ротора от номинального положения благодаря гибкости своих пальчиков. Характерные размеры пальчиковых уплотнений варьируются в широких пределах, что позволяет адаптировать их под различные условия эксплуатации. Материалы для изготовления уплотнений должны обладать жаропрочностью, упругостью, коррозионной и износостойкостью. Применение пальчиковых уплотнений ограничено необходимостью сохранения высоких механических свойств в условиях высоких температур, что делает их идеальным выбором для современных авиационных двигателей и других высоконагруженных систем. На основании проводимых ранее исследований известно, что одной из главных причин возникновения утечки происходит из-за увеличения радиального зазора между подъемными площадками и ротором, а также из-за их износа при наименьшей величине зазора. Проведено немалое количество исследований пальчиковых уплотнений, например, в работе Хедрикса [1] использовано численное моделирование для анализа эффективности работы уплотнения при определенных условиях, при этом полученные данные сравнивались с результатами щеточных и лабиринтных уплотнений. Результаты исследований показали, что герметичность пальчикового уплотнения была приближенно равна щеточному уплотнению и значительно меньше чем у лабиринтного. Аора с группой исследователей [2] в своей конструкции уплотнения предложили кольцевую проставку для выравнивания давления возникающего за пальчиками уплотнения, но при этом данная конструкция приводила к увеличению величины утечки. Чен и его коллеги [3] проанализировали механические свойства уплотнения при различных окружных формах ножки пальчика. Им и его коллегами был предложен метод оптимизации в проектировании геометрических параметров формы ножки пальчикового уплотнения. Браун с группой учёных [4-5] исследовали термомеханическое поведение пальчикового уплотнения с кольцевой приставкой и дополнительными каналами в ней для выравнивания давления в уплотнении. Он со своими коллегами изучал влияние протекания газа, температуры, перемещения пальчиков. Результаты исследований показали уменьшение подъемной силы при определенных условиях работы. Однако обеспечение стабильности газовой пленки при переменной скорости вращения и поддержания стабильного радиального зазора при изменяющихся температурных условиях, а также определенные погрешности, связанные с обработкой уплотнения являются одними из ключевых проблем уплотнения с кольцевой приставкой. При этом был сделан вывод, что конструкция пальчикового уплотнения должна обеспечивать малый уровень утечки при определенном соблюдении эксплуатационных требований. Известно, что при

повышении жесткости элементов пальчиков уменьшается утечка уплотняемой среды. Однако увеличение жесткости приведет к увеличению контактного давления между уплотнением и ротором и увеличит износ. Эта особенность является конструктивным противоречием. Чтобы устранить износ, вызванный конструкцией пальцевого уплотнения, Су с группой исследователей [6] попытались оптимизировать конструкцию пальчикового уплотнения. Другая группа ученых [7] во главе с Ли использовали стратегию Штакельберга для оптимизации формы элементов пальчиков. На основании которой была разработана новая форма пальчиков уплотнения. Проведено сравнение динамических характеристик традиционного пальцевого уплотнения и пальчикового уплотнения с новой формой изгиба. Новая форма пальчикового уплотнения позволила улучшить характеристики по сравнению с традиционной формой уплотнения. В исследовании не проводилось специального анализа структуры пальчиков уплотнения, что требует дальнейшего совершенствования геометрической структуры пальчикового уплотнения. Основываясь на динамических эксплуатационных характеристиках пальцевого уплотнения и фактических требованиях к инженерному проектированию уплотнительный узел можно выделить как многофакторную систему. Не только этот правильный подход к проектированию, но и проведению экспериментальных исследований позволяет оценить правильность разработанных и использованных теоретических моделей, и алгоритмов.

### **Основная часть**

Для оценки влияния различных факторов на расход воздуха в бесконтактном пальчиковом уплотнении необходимо проведение многофакторного эксперимента, для его осуществления была разработана экспериментальная установка 1 составной частью которой является модуль 2 для исследования влияние расходно-напорных характеристик бесконтактного пальчикового уплотнения (рисунок 1) [8-10].



*Рисунок 1 – Экспериментальная установка для исследования расходно-напорных характеристик уплотнений*

Вращение ротора в модуле 2 осуществлялось через муфту с помощью электродвигателя. Для исследования влияние расходных характеристик бесконтактного уплотнения к установке был подключен пневматический контур, через который подается сжатый воздух в исследуемый модуль 2, где находится уплотнительный узел. Пневматический контур включает в себя ротаметры 3 соединенные посредством фитингов и термопластической трубки 4. Для контроля и записи данных во время эксперимента используется информационно-измерительная система, состоящая из микроконтроллера, размещенного в корпусе 5 соединенного с компьютером, датчиков давления 6 измеряющих

перепад давления до и после прохождения уплотняемой среды через уплотнительный узел, датчики температуры 7 и датчиков оборотов — на фото не показан.

При проведении эксперимента контроль параметров происходил в режиме реального времени, при этом все измеряемые параметры записывались в файл для последующей дальнейшей обработки.

При обработке эксперимента, в качестве математической модели, описывающей зависимость изменения расхода воздуха, была выбрана статистическая регрессионная модель. Для получения адекватной модели был поставлен и проведен уровневый факторный эксперимент типа  $2^3$ , который ставился в локальной области времени. За выходной параметр Y принимали расход воздуха  $Q, \text{ м}^3/\text{ч}$ .

На основании предварительных исследований и анализов литературных данных в качестве основных факторов, влияющих на расход воздуха, были выбраны следующие:

- $X_1$  – давление ресивера P, бар;
- $X_2$  – частота вращения n, об/мин;
- $X_3$  – зазор S, мм.

Выбор уровней и интервалов варьирования факторов проводили на основании предварительных опытов (таблица 1).

Таблица 1 – Исследуемые факторы в действительных значениях

Факторы	Обозначение	Уровни варьирования					Интервалы варьирования
		-2	-1	0	1	2	
давление P, бар	$X_1$	1	2	3	4	5	1
частота вращения n, об/мин	$X_2$	500	1000	1500	2000	2700	500
зазор S, мм	$X_3$	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,05

Для обработки данных проведенного полнофакторного эксперимента ( $5 \times 5 \times 5 = 125$  показаний) будем использовать уравнение регрессии, характеризующее зависимость расхода воздуха (Y) от трех влияющих факторов ( $x_1, x_2, x_3$ ), которую представим в виде полинома 2 степени:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 + b_5x_1x_3 + b_6x_2x_3 + b_7x_1^2 + b_8x_2^2 + b_9x_3^2 \quad (1)$$

В результате проведенных вычислений было получено уравнение регрессии, которое имеет следующий вид:

$$Y = 1,306 + 1,907x_1 + 0,00033x_2 + 5,28x_3 + 0,0001x_{12} \quad (2)$$

Подставим вместо обозначений факторы, при этом уравнение примет следующий вид:

$$Q = 1,306 + 1,907P + 0,00033n + 5,28S + 0,0001P^2 \quad (3)$$

Результаты проведенных исследований по определению расхода воздуха в модуле с установленным бесконтактным уплотнением представлены на рисунках 2-4.

Анализ графиков полученных зависимостей показывает, что на расход воздуха в исследуемом бесконтактном уплотнении доминирующее влияние оказывает величина давления воздуха, подаваемого экспериментальный модуль. Вторым по значимости фактором, влияющим на расход воздуха, является зазор. Частота вращения ротора оказывает на расход воздуха наименьшее влияние.

### Заключение

В результате проведения исследований и анализа уравнения регрессии было выявлено следующее:

- Из уравнения регрессии следует, что доминирующее влияние оказывает изменение количественных значений величины давления ресивера, далее шероховатости поверхности. Частота вращения и зазор также оказывает влияние на расход воздуха, но менее выражено.
- Из уравнения регрессии следует, что существенное влияние рассматриваемых факторов друг на друга отсутствует. При этом коэффициент детерминации  $R^2=0,993$  показывает, что в 99,3% изменение расхода воздуха связано с исследуемыми факторами, а влияние неучтенных факторов составляет 0,7%.

- Полученную модель можно считать адекватной и полученное регрессионное уравнение достаточно точно описывает влияние факторов на изменение расхода воздуха в зависимости от разной величины давления, частоты вращения и зазора.

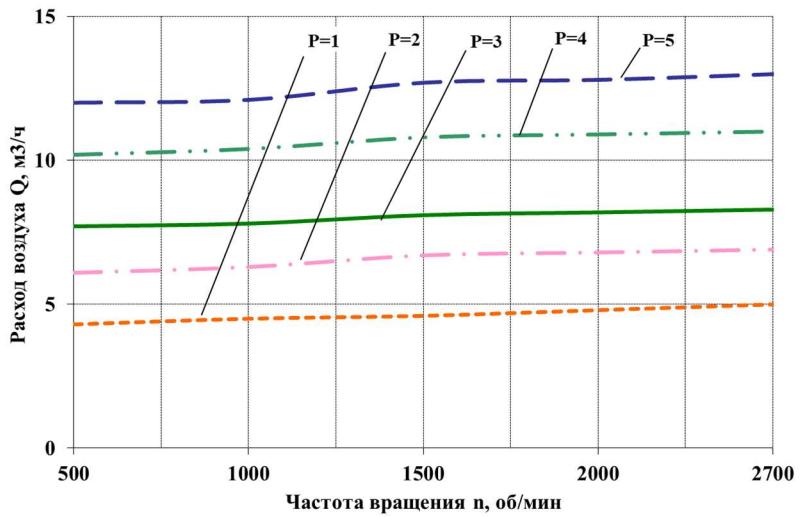


Рисунок 2 – Влияние частоты вращения ротора ( $n$ ) на расход воздуха ( $Q$ )

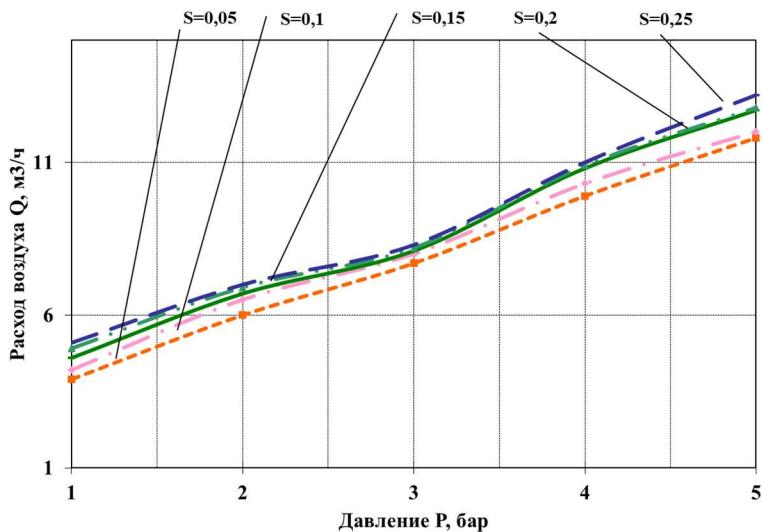


Рисунок 3 – Влияние давления ( $P$ ) на расход воздуха ( $Q$ )

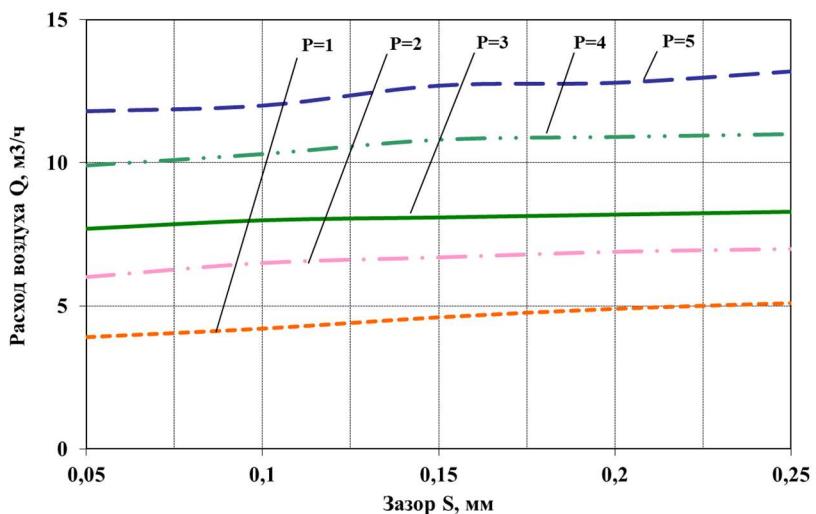


Рисунок 4 – Влияние зазора ( $S$ ) на расход воздуха ( $Q$ )

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. R.C Hendricks, Bern OHalloran, Gul K. Arora, et al (1994). Advances in Contacting Sealing. NASA CP-3282.
2. Gul K. Arora, Margaret P. Proctor, et al (1999). Pressure Balanced, Low Hysteresis, Finger Seal Test Results. AIAA-99-2686.
3. Zhang YC, Chen GD, Shen XL. Performance Optimization for Finger Seal Based on Fuzzy Nash Equilibrium Game. *Journal of Aerospace Power*, 2010, 25(1): pp. 228-233 (in chinese).
4. M.j. Braun, h.m. Pierson and d. Deng. Thermofluids Considerations and the Dynamic Behavior of a Finger Seal Assembly. *Tribology Transactions*, 2005, 48(4): pp. 531-547.
5. M. J. Braun, H. M. Pierson and V. V. Kudriavtsev. Finger Seal Solid Modeling Design and Some Solid/Fluid Interaction Considerations. *Tribology Transactions*, 2003, 46(4): pp. 566-575.
6. Su H, Chen GD. Structural Optimization of Finger Seal Based on Conceptions of "Customized" and "Generalized" Finger Curves. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2007, 28(6): pp. 1506-1512 (in chinese).
7. Li ES and Chen GD. Study on a new shape-curve of finger seal with low- hysteresis and low-wear. *Journal of Aerospace Power*, 2008, 23(4): pp. 759-764 (in chinese).
8. Поляков, Р.Н. Исследование лабиринтных уплотнений в мехатронных механизмах / Р.Н. Поляков, А.В. Внуков, М.А. Токмакова, И.В. Родичева. // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии – Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева - №6 (350) – 2021. С.71 – 77.
9. Горин, А.В. Повышение точности и достоверности полученных результатов при экспериментальных исследованиях узлов с бесконтактными уплотнениями механизмах / А.В Горин, Р.Н. Поляков, А.В. Внуков, И.В. Родичева, И.Л. Агашков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии – Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева - №1 (363) – 2024. С.67 – 77.
10. Родичев, А.Ю. Система мониторинга состояния узлов и агрегатов промышленного оборудования / А.Ю. Родичев, А.В. Горин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева - №6(362) – 2023. С.101 – 108.
11. ГОСТ 24026-80. Исследовательские испытания. Планирование эксперимента. Термины и определения.
12. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий \ Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М. Наука, 1976 – 280с.
13. Монтгомери Д. К. Планирование эксперимента и анализ данных: пер. с англ. – Л.: Судостроение, 1980 – 384 с.
14. Асатуян В.И. Теория планирования эксперимента: Учеб.Пособие для вузов /В. И. Асатуян – М.: Радио и связь, 1983. – 248с.
15. Бахарев Н.П. Планирование эксперимента: учеб. пособие / Н.П. Бахарев. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. – 77 с.
16. Бродский В.З. Введение в факторное планирование эксперимента /В. З. Бродский – М.: Наука, 1976.
17. Черноруцкий И.Г. Методы принятия решений /И. Г. Черноруцкий – С.Пб.: БХВ – Петербург, 2005. – 416 с.

**Внуков Алексей Васильевич**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел  
соискатель  
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 29  
E-mail: rodfox@yandex.ru

**Родичев Алексей Юрьевич**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел  
кандидат технических наук, доцент кафедры  
мехатроники, механики и робототехники  
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 29  
E-mail: rodfox@yandex.ru

**Преснепова Виктория Юрьевна**

МИРЭА - Российский технологический университет  
к.т.н., доцент, доцент кафедры индустриального  
программирования  
119454, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78  
E-mail: presnetsova@mirea.ru

**Родичева Ирина Владимировна**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел  
аспирант кафедры мехатроники, механики и  
робототехники  
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 29  
E-mail: irina.rodicheva.rodicheva@yandex.ru

**Васильев Кирилл Владимирович**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел  
Адрес: 302030, Россия, г. Орёл, ул. Московская, д.77  
Студент  
E-mail: gm.vasiljev485@gmail.com

---

VNUKOV A.V., RODICHEV A.Yu., PRESNETSOVA V.Yu., RODICHEVA I.V., VASILIEV K.V.

## **STUDY OF THE INFLUENCE OF DESIGN AND TECHNOLOGICAL FACTORS ON AIR FLOW IN A CONTACTLESS SEAL**

**Abstract.** The article contains a study of the influence of design and technological factors on air consumption in a contactless seal. The authors conducted an analytical study of the state of the issue of using contactless seals,

considered the problems and ways to solve them. The article describes an experimental setup with a module under study containing a contactless seal, and also provides the methodology and results of calculating the conducted multifactorial experiment. The dependence of the air flow passing through the experimental unit with a contactless seal on various factors is established and described.

**Keywords:** non-contact seal, full factorial experiment, pressure, gap, air flow.

## BIBLIOGRAPHY

1. R. C. Hendricks, Bern OHalloran, Gul K. Arora, et al (1994). Advances in Contacting Sealing. NASA CP-3282.
2. Gul K. Arora, Margaret P. Proctor, et al (1999). Pressure Balanced, Low Hysteresis, Finger Seal Test Results. AIAA-99-2686.
3. Zhang YC, Chen GD, Shen XL. Performance Optimization for Finger Seal Based on Fuzzy Nash Equilibrium Game. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(1): pp. 228-233 (in Chinese).
4. M.j. Braun, h.m. Pierson and d. Deng. Thermofluids Considerations and the Dynamic Behavior of a Finger Seal Assembly. Tribology Transactions, 2005, 48(4): pp. 531-547.
5. M. J. Braun, H. M. Pierson and V. V. Kudriavtsev. Finger Seal Solid Modeling Design and Some Solid/Fluid Interaction Considerations. Tribology Transactions, 2003, 46(4): pp. 566-575.
6. Su H, Chen GD. Structural Optimization of Finger Seal Based on Conceptions of "Customized" and "Generalized" Finger Curves. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(6): pp. 1506-1512 (in Chinese).
7. Li ES and Chen GD. Study on a new shape-curve of finger seal with low-hysteresis and low-wear. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(4): pp. 759-764 (in Chinese).
8. Polyakov, R.N. Study of labyrinth seals in mechatronic mechanisms / R.N. Polyakov, A.V. Vnukov, M.A. Tokmakova, I.V. Rodicheva. // Fundamental and applied problems of engineering and technology - Orel: OSU named after I.S. Turgenev - No. 6 (350) - 2021. P. 71 - 77.
9. Gorin, A.V. Increasing the accuracy and reliability of the results obtained in experimental studies of units with contactless seals in mechanisms / A.V. Gorin, R.N. Polyakov, A.V. Vnukov, I.V. Rodicheva, I.L. Agashkov // Fundamental and applied problems of engineering and technology - Orel: Orel State University named after I.S. Turgeneva - No. 1 (363) – 2024. P. 67 – 77.
10. Rodichev, A. Yu. System for monitoring the state of units and assemblies of industrial equipment / A. Yu. Rodichev, A. V. Gorin // Fundamental and applied problems techniques and technologies - Orel: I.S. Turgenev Orel State University - No. 6 (362) – 2023. P. 101 – 108.
11. GOST 24026-80. Research tests. Experimental planning. Terms and definitions.
12. Adler, Yu.P. Experimental planning in the search for optimal conditions \ Yu.P. Adler, E.V. Markova, Yu.V. Granovsky. - M. Nauka, 1976 - 280 p.
13. Montgomery D.K. Experimental planning and data analysis: trans. from English – L.: Shipbuilding, 1980 – 384 p.
14. Asatryan V.I. Theory of Experimental Planning: Textbook for Universities /V.I. Asatryan – M.: Radio and Communications, 1983. – 248 p.
15. Bakharev N.P. Experimental planning: study guide / N.P. Bakharev. - Samara: Samara state tech. univ, 2013. - 77 p.
16. Brodsky V.Z. Introduction to factorial experimental planning /V. Z. Brodsky - M.: Science, 1976.
17. Chernorutsky I.G. Methods of decision-making /I. G. Chernorutsky - St. Petersburg: BHV - Petersburg, 2005. - 416 p.

**Vnukov Alexey Vasilevich**

Orel State University,  
applicant  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: rodfox@yandex.ru

**Rodichev Alexey Yuryevich**

Orel State University,  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department Mechatronics, Mechanics and Robotics  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail rodfox@yandex.ru

**Presnetsova Victoria Yuryevna**

MIREA - Russian Technological University  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Industrial  
Programming  
119454, Moscow, Vernadsky Avenue, 78  
E-mail: presnetsova@mirea.ru

**Rodicheva Irina Vladimirovna**

Orel State University,  
Postgraduate student of the Department Mechatronics,  
Mechanics and Robotics  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail irina.rodicheva.rodicheva@yandex.ru

**Vasiliev Kirill Vladimirovich,**

Orel State University  
Adress: 302026, Russia, Orel, Moskovskaya str., 77  
Student  
E-mail: gm.vasiljev485@gmail.com

БОЛГОВА Е.А., МУКУТАДЗЕ М.А.

## ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ РАДИАЛЬНОГО ПОДШИПНИКА ПРИ УЧЕТЕ СЖИМАЕМОСТИ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА

**Аннотация.** Полимерное покрытие на поверхности трибосистемы с канавкой выполняет несколько ключевых функций: помогает смазочному веществу более равномерно распределяться по поверхности подшипника, минимизирует риск образования сухого трения, способствует более эффективному отводу тепла, предотвращающему перегрев рабочей зоны, и уменьшает износ подшипника. В условиях типичных для подшипников значительные нагрузки могут вызывать изменения в свойствах смазочного материала. Поэтому введение параметра сжимаемости в модель позволяет более точно предсказать поведение смазочного вещества и эффективность смазки в различных режимах работы подшипника.

В статье получена уточненная математическая модель, описывающая поведение микрополярного смазочного материала в рабочем зазоре радиального подшипника, учитывая сжимаемость. Новая математическая модель получена на основе известных уравнений. Первым уравнением является то, которое описывает движение микрополярной смазочной жидкости. Эта жидкость обладает вязкостью и сжимаемостью и находится в условиях «тонкого слоя». В дополнение к этому используется уравнение неразрывности, как в статье [21], а также уравнение состояния. Всё это позволяет выполнить оценку величины гидродинамического давления, нагрузочной способности и силы трения при ламинарном режиме течения смазочного материала. Произведено сравнение численных результатов теоретических моделей с экспериментальными данными, учитывая новые факторы.

Новизна полученных моделей является в разработке новой методики инженерных расчетов усовершенствованной конструкции радиального подшипника скольжения с учетом сжимаемости смазочного материала, позволяющей определить величину основных триботехнических параметров.

Результаты исследования показали, что усовершенствованная конструкция радиального подшипника значительно улучшает его эксплуатационные характеристики. Было отмечено уменьшение коэффициента трения и увеличение несущей способности. В результате удалось добиться продления срока службы трибоконтакта, что имеет большое значение для его применения в промышленности.

**Ключевые слова:** сжимаемость, модифицированная конструкция, покрытие, ламинарный режим, оценка износстойкости, адаптированный профиль.

### Введение

Негативное влияние сжимаемости смазочного материала на характеристики трибоузлов требует внимания, его игнорирование может привести к снижению подачи масла, уменьшению коэффициента полезного действия, ухудшению быстродействия двигателя и возникновению нестабильности в работе механизмов.

Теоретическое и экспериментальное изучение сжимаемости смазочных материалов позволяет разрабатывать более точные модели и методы расчета, способствующие конструированию более устойчивых и эффективных трибоузлов.

Исследования [1–4], посвященные подшипникам скольжения с полимерным покрытием, представляют собой важный вклад в машиностроительную и авиакосмическую индустрию. Применение полимерных покрытий на опорных поверхностях подшипников значительно улучшает эксплуатационные характеристики последних и продлевает срок их службы. Свойства полимеров делают их незаменимыми в качестве покрытий в условиях граничного трения при запуске и гидродинамического режима смазывания во время работы.

Использование надежной техники в промышленности с высокой производительностью требует создания новых и совершенствования действующих узлов и механизмов, в том числе подшипников скольжения [5–8].

Анализ работ [9–13], посвященных гидродинамическому режиму движения смазочного материала, показывает, что для расширения и конкретизации исследований применительно к трибоузлам, работающим в разных условиях, необходимо проводить исследования новых моделей течения, позволяющих раскрыть закономерности сложных тепловых и гидродинамических процессов, протекающих в смазываемых парах трения.

Эффективность использования металлоплакирования в железнодорожной инфраструктуре подтверждается многочисленными исследованиями [14–20]. Покрытия, созданные с использованием металлоплакирования, обладают высокой стойкостью к абразивному износу, что позволяет значительно продлить срок службы трибоузлов.

Уменьшение трения не только снижает износ, но и способствует более плавному и стабильному движению, что существенно сокращает вибрационные нагрузки.

Анализ проведенных исследований подчеркивает важность разработки расчетных моделей подшипников – одного из самых распространенных типов трибосопряжений.

### Постановка задачи

Проводится оценка износстойкости модифицированной конструкции радиального подшипника при учете сжимаемости и ламинарного течения смазочного материала. При этом принято, что скорость движения  $\Omega$ , а скорость втулки – нулю.

Для решения задачи по оценке на износстойкость представлены уравнения контуров с началом в центре вала (рисунок 1).

$$C_1 : r' = r_0, \quad C_0 : r' = r_0 - \tilde{h}, \quad C_2 : r' = r_1(1+H) - a' \sin \omega \theta. \quad (1)$$

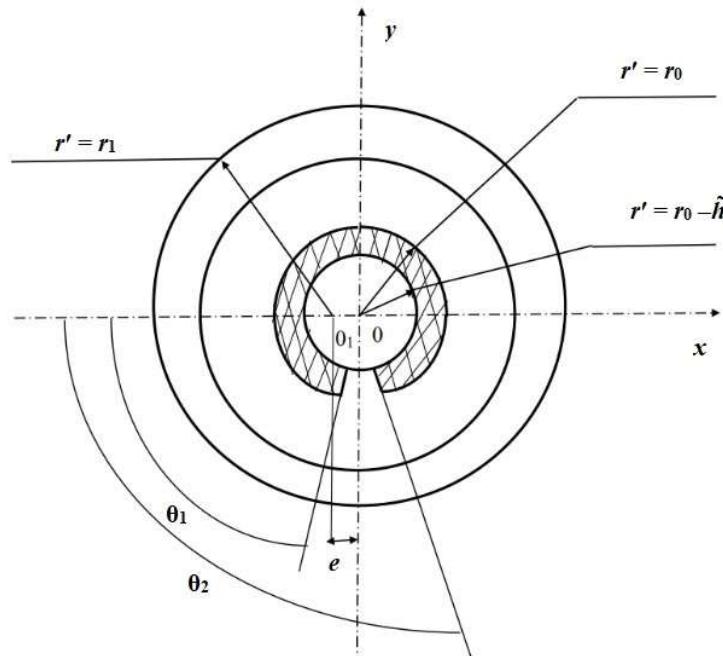


Рисунок 1 – Схема трибоконтакта

### Разработка математической модели

Для разработки расчетной модели используем следующие исходные уравнения. Первым уравнением является то, которое описывает движение смазочной жидкости. Эта жидкость обладает вязкостью и сжимаемостью и находится в условиях «тонкого слоя». В дополнение к этому используется уравнение неразрывности, как в статье [21], а также уравнение состояния с граничными условиями:

$$\begin{aligned} (2\mu' + \kappa') \left( \frac{\partial^2 v_{\theta_i}}{\partial r'^2} + \frac{1}{r'} \frac{\partial v_{\theta_i}}{\partial r'} \right) &= \frac{1}{r'} \frac{dp'_i}{d\theta} - \kappa' \frac{\partial' v_{r'_i}}{\partial r'}, \\ \gamma' \left( \frac{\partial^2 v'_i}{\partial r'^2} + \frac{1}{r'} \frac{\partial v'_i}{\partial r'} \right) &= \kappa' v'_i + \kappa' \frac{\partial v_{\theta_i}}{\partial r'}, \quad \frac{\partial (\rho' v'_{r'_i})}{\partial r'} + \frac{(\rho' v'_{r'_i})}{r'} + \frac{1}{r'} \frac{\partial (\rho' v_{\theta_i})}{\partial \theta} = 0, \\ p' = \frac{\lambda \Omega^2 r^2}{2} \rho' &; \end{aligned} \quad (2)$$

$$v_{\theta} = 0, \quad v_{r'} = 0 \quad \text{при} \quad r' = r_1(1+H) - a' \sin \omega \theta,$$

$$v_{r'} = 0 \quad v_{\theta} = \Omega(r_0 - \tilde{h}) \quad \text{при} \quad r' = r_1 - \tilde{h},$$

$$v'_{r'} = 0, \quad v_{\theta} = \Omega r_0 \quad \text{при} \quad r' = r_0,$$

$$p(0) = p(\theta) = p_g, \quad r_0 - \tilde{h} = h^* \quad \text{при} \quad \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2.$$

Для удобства решения применим переход к безразмерным величинам:

$$\begin{aligned}
 r' &= (r_0 - \tilde{h}) + \delta r, \quad \delta = r_1 - (r_0 - \tilde{h}); \quad v_{r'} = \Omega \delta u_i, \quad v_{\theta_i} = \Omega v_i (r_0 - \tilde{h}), \\
 p' &= p^* p, \quad p^* = \frac{(2\mu + \kappa) \Omega (r_0 - \tilde{h})^2}{2\delta^2}; \\
 \mu' &= \mu, \quad \kappa' = \kappa, \quad \gamma' = \gamma, \\
 N^2 &= \frac{\kappa}{2\mu + \kappa}, \quad N_1 = \frac{2\mu l^2}{\delta^2 \kappa}, \quad l^2 = \frac{\gamma}{4\mu}, \\
 \rho^* &= \frac{2p_g}{\lambda \Omega^2 r_0^2}, \quad \rho' = \rho^* \rho. \tag{4}
 \end{aligned}$$

В результате произведенных преобразований (5), опираясь на уравнения (3) и (4), мы получили выражения:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial^2 u_i}{\partial r^2} + N^2 \frac{\partial v_i}{\partial r} &= \frac{1}{\Lambda} \cdot \frac{dp_i}{d\theta}, \quad \frac{\partial^2 v_i}{\partial r^2} - \frac{v_i}{N_1} - \frac{1}{N_1} \cdot \frac{du_i}{dr} = 0, \\
 \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial \theta} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial r} &= 0, \quad p = \rho. \tag{5}
 \end{aligned}$$

$$u = 0, \quad v = 0, \quad \nu = 0 \quad \text{при } r = 1 + \eta \cos \theta - \eta_1 \sin \omega \theta = h(\theta),$$

$$u = 1, \quad \nu = 0, \quad v = 1 \quad \text{при } r = r_0, \quad 0 \leq \theta \leq \theta_1 \text{ и } \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi,$$

$$u = 1, \quad \nu = 0, \quad v = 1 \quad \text{при } r = r_0 - \tilde{h}, \quad \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2,$$

$$p(0) = p(\theta_1) = p(\theta_2) = p(2\pi) = \frac{p_g}{p^*}. \tag{6}$$

$$Q = \text{const}; \quad p_3(\theta_2) = p_2(\theta_2); \quad p_1(\theta_1) = p_2(\theta_1).$$

$$\dot{v}^*(\theta) = \frac{1}{h(\theta) - \eta_2}, \quad \dot{u}^*(\theta) = \frac{\eta \sin \theta}{h(\theta) - \eta_2}.$$

С учетом сжимаемости смазочного материала пренебрегаем  $\frac{1}{N_1} \ll 1$ , тогда уравнение

(5) преобразуется к виду:

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial r^2} + \frac{N_i^2}{2h} (2r - h) = \frac{1}{\Lambda} \cdot \frac{dp_i}{d\theta}, \quad v_i = \frac{1}{2h} (r^2 - rh), \quad \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial \theta} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial r} = 0, \quad p = \rho. \tag{7}$$

Автомодельное решение задачи (7) с учетом параметров (6) найдено благодаря использованию известной методики [22]

$$\begin{aligned}
 \rho v_i &= \frac{\partial \Psi_i}{\partial r} + V_i(r, \theta), \quad \rho u_i = -\frac{\partial \Psi_i}{\partial \theta} + U_i(r, \theta), \\
 \Psi_i(r, \theta) &= \tilde{\Psi}_i(\xi_i), \quad V_i(r, \theta) = p \tilde{v}_i(\xi_i), \quad U_i(r, \theta) = -p \tilde{u}_i(\xi_i) \cdot h'(\theta), \\
 \xi_i &= \frac{r_i}{h(\theta)} \quad \text{при } 0 \leq \theta \leq \theta_1 \text{ и } \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi, \\
 \xi_i &= \frac{r - \eta_2}{h(\theta) - \eta_2} \quad \text{при } \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2. \tag{8}
 \end{aligned}$$

Для гидродинамического давления получены следующие аналитические выражения:

$$\begin{aligned}
 p_1 &= 1 + 6\Lambda \left( 1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left( \frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \times \\
 &\times \left( \eta \sin \theta + \frac{\eta_1}{\omega} (\cos \omega \theta - 1) - \frac{1}{p} \frac{\eta_1 \theta}{2\pi \omega} (\cos 2\pi \omega - 1) \right),
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 p_2 = & 1 + \frac{6\Lambda}{(1+\tilde{h})^2} \left[ 1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left( \frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right] \left[ (\theta - \theta_1) \left( \frac{\theta_1^2}{4\pi^2} + \left( 1 - \frac{5\theta_1}{2\pi} \right) \times \right. \right. \\
 & \times \left( \frac{\tilde{\eta}_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - \cos \omega\theta_1) - \frac{\tilde{\eta}}{2\pi} \sin \theta_1 \right) \left. \right) + \frac{1}{p} \left( 1 - \frac{3\theta_1^2}{4\pi^2} \right) \times \\
 & \times \left. \left( \tilde{\eta} (\sin \theta - \sin \theta_1) + \frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} (\cos \omega\theta - \cos \omega\theta_1) \right) \right], \\
 p_3 = & 1 + 6\Lambda \left[ 1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left( \frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right] \left[ (\theta - \theta_2) \left( \frac{\theta_2^2}{4\pi^2} + \left( 1 - \frac{5\theta_2}{2\pi} \right) \times \right. \right. \\
 & \times \left( \frac{\eta_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - \cos \omega\theta_2) - \frac{\eta}{2\pi} \sin \theta_2 \right) \left. \right) + \frac{1}{p} \left( 1 - \frac{3\theta_2^2}{4\pi^2} \right) \times \\
 & \times \left. \left( \eta (\sin \theta - \sin \theta_2) + \frac{\eta_1}{\omega} (\cos \omega\theta - \cos \omega\theta_2) \right) \right]. \tag{9}
 \end{aligned}$$

Решая уравнение (9) методом последовательных приближений, ограничившись при этом двумя приближениями, в результате получим:

$$\begin{aligned}
 p_{10} = & 1, \quad p_{20} = 1, \quad p_{30} = 1. \\
 p_{11} = & 6\Lambda \left[ 1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left( \frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right] \left( \eta \sin \theta + \frac{\eta_1}{\omega} (\cos \omega\theta - 1) - \frac{\eta_1 \theta}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - 1) \right), \\
 p_{21} = & \frac{6\Lambda}{(1+\tilde{h})^2} \left[ 1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left( \frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right] \left[ (\theta - \theta_1) \left( \frac{\theta_1^2}{4\pi^2} + \left( 1 - \frac{5\theta_1}{2\pi} \right) \times \right. \right. \\
 & \times \left( \frac{\tilde{\eta}_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - \cos \omega\theta_1) - \frac{\tilde{\eta}}{2\pi} \sin \theta_1 \right) \left. \right) + \left( 1 - \frac{3\theta_1^2}{4\pi^2} \right) \times \\
 & \times \left. \left( \tilde{\eta} (\sin \theta - \sin \theta_1) + \frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} (\cos \omega\theta - \cos \omega\theta_1) \right) \right], \\
 p_{31} = & 6\Lambda \left[ 1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left( \frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right] \left[ (\theta - \theta_2) \left( \frac{\theta_2^2}{4\pi^2} + \left( 1 - \frac{5\theta_2}{2\pi} \right) \times \right. \right. \\
 & \times \left( \frac{\eta_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - \cos \omega\theta_2) - \frac{\eta}{2\pi} \sin \theta_2 \right) \left. \right) + \left( 1 - \frac{3\theta_2^2}{4\pi^2} \right) \times \\
 & \times \left. \left( \eta (\sin \theta - \sin \theta_2) + \frac{\eta_1}{\omega} (\cos \omega\theta - \cos \omega\theta_2) \right) \right]. \tag{10}
 \end{aligned}$$

Проведенные проверки подтвердили надежность предложенной теоретической модели в указанных диапазонах параметров. В частности, значения параметра сжимаемости  $\Lambda = 0,1 - 0,9$ , напряжения  $\sigma$  в диапазоне 16–80 МПа были тщательно протестированы, чтобы убедиться в точности и применимости модели в широком диапазоне сценариев.

Исследование началось с верификации разработанной расчетной модели. Для этого были проведены численные расчеты, которые позволили оценить основные параметры функционирования подшипника. Верификация включала сопоставление этих расчетных данных с результатами лабораторных испытаний. Анализ показал, что расчетная модель с высокой степенью точности предсказывает поведение конструкции, при этом выявленные отклонения находятся в пределах допустимой погрешности.

Исследование позволило уточнить данные о рабочих характеристиках подшипников с полимерным покрытием (таблица 1). Уточнены несущая способность на 9–11 %, а

коэффициент трения – на 7–8 %. В дальнейших исследованиях представляется целесообразным изучение дополнительных факторов, таких как температурные условия, динамические нагрузки и взаимодействие с различными смазочными материалами, которое даст возможность продолжить совершенствовать конструкции таких подшипников и расширять области их применения.

Таблица 1 – Результаты теоретического исследования

№	$\sigma$ , МПа	Параметр сжимаемости $\Lambda$				
		0,9	0,7	0,5	0,3	0,1
		Коэффициент трения				
1	16	0,0095	0,0120	0,0095	0,0068	0,0042
2	32	0,0063	0,0064	0,0065	0,0048	0,0034
3	48	0,0030	0,0032	0,0031	0,00297	0,00294
4	64	0,0029	0,0031	0,0030	0,00291	0,00292
5	80	0,00208	0,0030	0,0029	0,00295	0,00981

Данные эксперимента показали наличие колебаний коэффициента трения. Такое поведение коэффициента трения при увеличении нагрузки указывает на сложность взаимодействий в системе, особенно с учетом того, что максимальная нагрузка достигала 80 МПа, что эквивалентно ступенчатому увеличению нагрузки в 5 раз (таблица 2).

Таблица 2 – Сравнительный анализ результатов исследования

№ п/п	Режим		Теоретический результат		Экспериментальное исследование	
	$\sigma$ , МПа	$V$ , м/с	без учета сжимаемости	с учетом сжимаемости	без учета сжимаемости	с учетом сжимаемости
1	16	0,2	0,0160	0,0142	0,0184	0,0159
2	32	0,2	0,0099	0,0088	0,0097	0,0087
3	48	0,2	0,0085	0,0066	0,0098	0,0078
4	64	0,2	0,0099	0,0076	0,0091	0,0097
5	80	0,2	0,0140	0,0097	0,0152	0,0097

### Выводы

1. Проведенное исследование привело к значительному расширению возможностей на практике оценивать критически важные эксплуатационные характеристики радиального подшипника скольжения.

2. Исследование радиальных подшипников скольжения, принимающее в учет сжимаемость, показало значительное улучшение их эксплуатационных характеристик. Результаты исследований демонстрируют, что несущая способность таких подшипников уточняется на 9–11 %, а коэффициент трения – на 7–8 %. Этот прогресс не только выявляет важные конструкционные аспекты, но и открывает новые перспективы для применения указанных подшипников в различных инженерных сферах.

### Обсуждение и заключение

С учетом ранее установленных эксплуатационных параметров канавок была разработана расчетная модель, детально описывающая поведение подшипника в гидродинамическом режиме. Особое внимание уделено сжимаемости микрополярного вязкого смазочного материала, параметры которого зависят от условий трения.

Итогом проведенного исследования стала возможность устанавливать основные эксплуатационные характеристики подшипника на этапе проектирования, что существенно повышает его надежность и долговечность и является важным шагом в развитии технологий подшипников и смазочных материалов, предоставляя инженерам эффективные инструменты для оптимизации их работы.

Таким образом, разработанные на теоретической основе и подтвержденные экспериментально новые модели могут быть использованы в таких отраслях, как машиностроение, авиастроение, приборостроение и других, где необходимо поддержание гидродинамического режима.

### Условные обозначения

$r_0$  – радиус вала с полимерным покрытием;  $r_1$  – радиус подшипниковой втулки;  $e$  – эксцентриситет;  $\varepsilon$  – относительный эксцентриситет;  $h'$  – высота канавки;  $a'$  и  $\omega$  – амплитуда возмущения и параметр адаптированного профиля втулки соответственно;  $\mu'$  – коэффициент

динамической вязкости смазочного материала;  $\kappa'$ ,  $\gamma'$  – коэффициенты вязкости микрополярного смазочного материала;  $p'$  – гидродинамическое давление в смазочном слое;  $\alpha'$  – экспериментальная постоянная величина;  $\Lambda$  – параметр сжимаемости;  $\eta_1$  – конструктивный параметр.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хасьянова, Д.У. Повышение износостойкости радиального подшипника скольжения, смазываемого микрополярными смазочными материалами и расплавами металлического покрытия / Д.У. Хасьянова, М.А. Мукутадзе // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2022. – № 4. – С. 46–53. – DOI 10.31857/S0235711922040101.
2. Хасьянова, Д.У. Исследование на износостойкость радиального подшипника с нестандартным опорным профилем с учетом зависимости вязкости от давления и температуры / Д.У. Хасьянова, М.А. Мукутадзе // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2023. – № 3. – С. 42–49.
3. Исследование износостойкости подшипника скольжения с полимерным покрытием опорного кольца, имеющего канавку / В.В. Василенко, В.И. Кирищева, М.А. Мукутадзе, В.Е. Шведова // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). – 2022. – Т. 22, № 4. – С. 365–372.
4. Повышение износостойкости радиального подшипника с нестандартным опорным профилем и полимерным покрытием на поверхности вала с учетом зависимости вязкости от давления / Х.Н. Абдулрахман, В.И. Кирищева, М.А. Мукутадзе, В.Е. Шведова // Frontier Materials & Technologies. – 2022. – № 4. – С. 9–17.
5. Polyakov, R. The method of long-life calculation for a friction couple «rotor-hybrid bearing» / R. Polyakov, L. Savin // Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering, COUPLED PROBLEMS 2017, Rhodes Island, June 12–14, 2017. – P. 433–440.
6. Polyakov, R. Predictive analysis of rotor machines fluid-film bearings operability / R. Polyakov // Vibroengineering Procedia. – 2020. – Vol. 30. – P. 61–67. – DOI 10.21595/vp.2020.21379.
7. Kornaeva, E.P. Application of artificial neural networks to diagnostics of fluid-film bearing lubrication / E.P. Kornaeva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 734, No. 012154. – DOI 10.1088/1757-899X/734/012154.
8. Shutin, D.V. Active hybrid bearings as mean for improving stability and diagnostics of heavy rotors of power generating machinery / D.V. Shutin, R.N. Polyakov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 862, No. 032098. – DOI 10.1088/1757-899X/862/3/032098.
9. Поляков, Р.Н. Математическая модель бесконтактного пальчикового уплотнения с активным управлением зазором / Р.Н. Поляков, Л.А. Савин, А.В. Внуков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2018. – № 1 (327). – С. 66–71.
10. Исследование вязкоупругих и адгезионно-прочностных свойств и разработка эффективных вибропоглощающих композиционных полимерных материалов и покрытий машиностроительного назначения / С.С. Негматов [и др.] // Пластические массы. – 2020. – № 7–8. – С. 32–36.
11. Исследование электропроводящих композиционных термореактивных полимерных материалов и покрытий на их основе для триботехнического назначения / Г.И. Сайфуллаева [и др.] // Universum: технические науки. Электронный научный журнал. – 2020. № 12(81). – URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/11102> (дата обращения: 25.07.2024).
12. Исследование стойкости полимерных покрытий в условиях воздействия климатических факторов черноморского побережья / В.Т. Ерофеев [и др.] // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 11–5. – С. 911–924. – URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41277> (дата обращения: 25.07.2024).
13. Икромов, Н.А. Объекты и методики исследования композиционных полимерных материалов / Н.А. Икромов, Д.Н. Расулов // Современные научные исследования и инновации. – 2020. – № 10. – URL: <https://web.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068366620040121> (дата обращения: 25.07.2024).
14. Zinoviev, V.E. Analysis of factor affecting the strength of fixed bonds assembled using metal-polymer compositions / V.E. Zinoviev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 900 (1), No. 012009. – DOI 10.1088/1757-899X/900/1/012009.
15. Харламов, П.В. Мониторинг изменений упруго-диссипативных характеристик для решения задач по исследованию трибологических процессов в системе «железнодорожный путь – подвижной состав» / П.В. Харламов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 1. – С. 122–129. – DOI 10.46973/0201-727X\_2021\_1\_122.
16. Харламов, П.В. Применение физико-химического подхода для изучения механизма образования вторичных структур фрикционного переноса на поверхности контртела / П.В. Харламов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 3. – С. 37–45. – DOI 10.46973/0201-727X\_2021\_3\_37.
17. Харламов П.В. Исследование образования вторичных структур фрикционного переноса на поверхности стальных образцов при реализации технологии металлокраскирования / П.В. Харламов // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2021. – № 12. – С. 556–560. – DOI 10.36652/0202-3350-2021-22-12-556-560.
18. Повышение эффективности фрикционной системы «колесо – рельс» / В.В. Шаповалов [и др.] // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2019. – Т. 78, № 3. – С. 177–182.
19. Improving the efficiency of the path – rolling stock system based on the implementation of anisotropic frictional bonds / V.V. Shapovalov [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 900 (1), No. 012011. – DOI 10.1088/1757-899X/900/1/012011.
20. Металлокраскирование рабочих поверхностей трения пары «колесо – рельс» / В.В. Шаповалов [и др.] // Трение и износ. – 2020. – Т. 41, № 4. – С. 464–474. – DOI 10.3103/S1068366620040121.

21. Киришиева, В.И. Повышение износостойкости радиального подшипника с некруговым опорным профилем и фторопластодержащим композиционным полимерным покрытием / В.И. Киришиева, М.А. Мукутадзе // Транспортное машиностроение. – 2022. – № 11 (11). – С. 10–17. – DOI 10.30987/2782-5957-2022-11-10-17.

22. Киришиева, В.И. Повышение износостойкости радиального подшипника с полимерным покрытием / В.И. Киришиева, М.А. Мукутадзе // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2022. – № 5 (355). – С. 3–8. – DOI 10.33979/2073-7408-2022-355-5-3-8.

**Болгова Екатерина Александровна**  
ФГБОУ ВО «Ростовский государственный  
университет путей сообщения»,  
аспирант кафедры  
«Высшая математика»,  
344038, г. Ростов-на-Дону,  
пл. Ростовского Стрелкового Полка  
Народного Ополчения, 2  
Тел. (961) 279-74-44  
E-mail: bolgova\_katya6@mail.ru

**Мукутадзе Мурман Александрович**  
ФГБОУ ВО «Ростовский государственный  
университет путей сообщения»,  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Высшая математика»,  
344038, г. Ростов-на-Дону,  
пл. Ростовского Стрелкового Полка  
Народного Ополчения, 2  
Тел. (919) 882-30-61  
E-mail: murman1963@yandex.ru

---

BOLGOVA E.A., MUKUTADZE M.A.

## **EVALUATION OF THE COEFFICIENT OF FRICTION OF A MODIFIED RADIAL BEARING DESIGN TAKING INTO ACCOUNT THE COMPRESSIBILITY OF THE LUBRICANT**

**Abstract.** The polymer coating on the surface of the tribosystem with a groove performs several key functions: it helps the lubricant to be more evenly distributed over the bearing surface, minimizes the risk of dry friction, promotes more efficient heat dissipation, prevents overheating of the working area, and reduces bearing wear. Under typical bearing conditions, significant loads can cause changes in the properties of the lubricant. Therefore, the introduction of the compressibility parameter into the model makes it possible to more accurately predict the behavior of the lubricant and the effectiveness of lubrication in various operating modes of the bearing.

An updated mathematical model describing the behavior of a micropolar lubricant in the working gap of a radial bearing, taking into account compressibility, is obtained in the article. A new mathematical model has been obtained based on known equations. The first equation is the one that describes the motion of a micropolar lubricating fluid. This liquid has viscosity and compressibility and is located in a "thin layer" environment. In addition, the continuity equation is used, as in the article [21], as well as the equation of state. All this makes it possible to evaluate the value of hydrodynamic pressure, load capacity and friction force in the laminar flow regime of the lubricant. The numerical results of theoretical models are compared with experimental data, taking into account new factors.

The novelty of the obtained models lies in the development of a new method of engineering calculations of an improved design of a radial sliding bearing, taking into account the compressibility of the lubricant, which allows determining the value of the main tribotechnical parameters.

The results of the study showed that the improved design of the radial bearing significantly improves its performance. A decrease in the coefficient of friction and an increase in load-bearing capacity were noted. As a result, it was possible to extend the service life of the tribocontact, which is of great importance for its application in industry.

**Keywords:** compressibility of the lubricant, modified bearing design, laminar flow, wear resistance assessment, adapted profile.

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Hasyanova, D.U. Povyshenie iznosostojkosti radialnogo podshipnika skolzheniya, smazyvaemogo mikropolyarnymi smazochnymi materialami i rasplavami metallicheskogo pokrytiya / D. U. Hasyanova, M. A. Mukutadze // Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin. – 2022. – № 4. – S. 46–53. – DOI 10.31857/S0235711922040101.
2. Hasyanova, D.U. Issledovanie na iznosostojkost radialnogo podshipnika s nestandardnym opornym profilem s uchetom zavisimosti vyazkosti ot davleniya i temperatury / D.U. Hasyanova, M.A. Mukutadze // Problemy mashinostroeniya i avtomatizacii. – 2023. – № 3. – S. 42–49.
3. Issledovanie iznosostojkosti podshipnika skolzheniya c polimernym pokrytiem opornogo kolca, imeyushchego kanavku / V.V. Vasilenko, V.I. Kirishchieva, M.A. Mukutadze, V.E. Shvedova // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). – 2022. – T. 22, № 4. – S. 365–372.
4. Povyshenie iznosostojkosti radialnogo podshipnika s nestandardnym opornym profilem i polimernym pokrytiem na poverhnosti vala s uchetom zavisimosti vyazkosti ot давления / H.N. Abdulrahman, V.I. Kirishchieva, M.A. Mukutadze, V.E. Shvedova // Frontier Materials & Technologies. – 2022. – № 4. – S. 9–17.
5. Polyakov, R. The method of long-life calculation for a friction couple «rotor-hybrid bearing» / R. Polyakov, L. Savin // Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering, COUPLED PROBLEMS 2017, Rhodes Island, June 12-14, 2017. – P. 433–440.

6. Polyakov, R. Predictive analysis of rotor machines fluid-film bearings operability / R. Polyakov // *Vibroengineering Procedia*. – 2020. – Vol. 30. – P. 61–67. – DOI 10.21595/vp.2020.21379.
7. Kornaeva, E.P. Application of artificial neural networks to diagnostics of fluid-film bearing lubrication / E.P. Kornaeva // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 734, No. 012154. – DOI 10.1088/1757-8997/734/012154.
8. Shutin, D.V. Active hybrid bearings as mean for improving stability and diagnostics of heavy rotors of power generating machinery / D.V. Shutin, R.N. Polyakov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 862, No. 032098. – DOI 10.1088/1757-899X/862/3/032098.
9. Polyakov, R.N. Matematicheskaya model beskontaktnogo palchikovogo uplotneniya s aktivnym upravleniem zazorom / R.N. Polyakov, L.A. Savin, A.V. Vnukov // *Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*. – 2018. – № 1 (327). – S. 66–71.
10. Issledovanie vyazkouprugih i adgezionno-prochnostnyh svojstv i razrabotka effektivnyh vibropogloshchayushchih kompozicionnyh polimernyh materialov i pokrytij mashinostroitelnogo naznacheniya / S.S. Negmatov [i dr.] // *Plasticheskie massy*. – 2020. – № 7–8. – S. 32–36.
11. Issledovanie elektroprovodnyashchih kompozicionnyh termoreaktivnyh polimernyh materialov i pokrytij na ih osnove dlya tribotekhnicheskogo naznacheniya / G.I. Sajfullaeva [i dr.] // *Universum: tekhnicheskie nauki. Elektronnyj nauchnyj zhurnal*. – 2020. № 12(81). – URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/11102> (data obrashcheniya: 25.07.2024).
12. Issledovanie stojkosti polimernyh pokrytij v usloviyah vozdejstviya klimaticheskikh faktorov chernomorskogo poberezhya / V.T. Erofeev [i dr.] // *Fundamentalnye issledovaniya*. – 2016. – № 11–5. – S. 911–924. – URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41277> (data obrashcheniya: 25.07.2024).
13. Ikromov, N.A. Ob"ekty i metodiki issledovaniya kompozicionnyh polimernyh materialov / N.A. Ikromov, D.N. Rasulov // *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovacii*. – 2020. – № 10. – URL: <https://web.snauka.ru/issues/2020/10/93640> (data obrashcheniya: 25.07.2024).
14. Zinoviev, V.E. Analysis of factor affecting the strength of fixed bonds assembled using metal-polymer compositions / V.E. Zinoviev // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 900 (1), No. 012009. – DOI 10.1088/1757-899X/900/1/012009.
15. Harlamov, P.V. Monitoring izmenenij uprugo-dissipativnyh harakteristik dlya resheniya zadach po issledovaniju tribologicheskikh processov v sisteme «zheleznodorozhnyj put – podvizhnoj sostav» / P.V. Harlamov // *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya*. – 2021. – №. 1. – S. 122–129. – DOI 10.46973/0201-727X\_2021\_1\_122.
16. Harlamov, P.V. Primenenie fiziko-himicheskogo podhoda dlya izuchenija mekhanizma obrazovaniya vtorichnyh struktur friкционного perenosa na poverhnosti kontrtela / P.V. Harlamov // *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya*. – 2021. – №. 3. – S. 37–45. – DOI 10.46973/0201-727X\_2021\_3\_37.
17. Harlamov P.V. Issledovanie obrazovaniya vtorichnyh struktur friкционного perenosa na poverhnosti stalnyh obrazcov pri realizacii tekhnologii metalloplakirovaniya / P.V. Harlamov // *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii*. – 2021. – № 12. – S. 556–560. – DOI 10.36652/0202-3350-2021-22-12-556-560.
18. Povyshenie effektivnosti frikcionnoj sistemy «koleso – rels» / V.V. Shapovalov [i dr.] // *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhного transporta*. – 2019. – T. 78, № 3. – S. 177–182.
19. Improving the efficiency of the path – rolling stock system based on the implementation of anisotropic frictional bonds / V.V. Shapovalov [et al.] // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 900 (1), No. 012011. – DOI 10.1088/1757-899X/900/1/012011.
20. Metalloplakirovanie rabochih poverhnostej treniya pary «koleso – rels» / V.V. Shapovalov [i dr.] // *Trenie i iznos*. – 2020. – T. 41, № 4. – S. 464–474. – DOI 10.3103/S1068366620040121.
21. Kirishchieva, V.I. Povyshenie iznosostojkosti radialnogo podshipnika s nekrugovym opornym profilem i ftoroplastsoderzhashchim kompozicionnym polimernym pokrytiem / V.I. Kirishchieva, M.A. Mukutadze // *Transportnoe mashinostroenie*. – 2022. – № 11 (11). – S. 10–17. – DOI 10.30987/2782-5957-2022-11-10-17.
22. Kirishchieva, V.I. Povyshenie iznosostojkosti radialnogo podshipnika s polimernym pokrytiem / V.I. Kirishchieva, M.A. Mukutadze // *Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*. – 2022. – № 5 (355). – S. 3–8. – DOI 10.33979/2073-7408-2022-355-5-3-8.

### Bolgova Ekaterina Aleksandrovna

Rostov State Transport University (RSTU),  
Postgraduate Student of the Department  
of Higher Mathematics,  
344038, Rostov-on-Don,  
Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo  
Opolcheniya sq., 2  
Ph. (961) 279-74-44  
E-mail: bolgova\_katya6@mail.ru

### Mukutadze Murman Aleksandrovich

Rostov State Transport University (RSTU),  
Doctor of Engineering Sciences, Professor,  
Head of the Department of Higher Mathematics,  
344038, Rostov-on-Don,  
Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo  
Opolcheniya sq., 2  
Ph. (919) 882-30-61  
E-mail: murman1963@yandex.ru

ФЕТИСОВ А.С., ЛИТОВЧЕНКО М.Г.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРИБОТРОННЫХ ОПОР РОТОРОВ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ СВОБОДНОГО ВЫБЕГА РОТОРА

**Аннотация.** В статье представлены результаты экспериментальных исследований момента трения активных гидростатодинамических подшипников скольжения. Представлены результаты решения задачи параметрического синтеза активных гибридных опор роторов с применением эволюционных алгоритмов, которые включают в себя четыре конфигурации с различными показателями момента вязкого трения. Представлена методика проведения экспериментальных замеров момента трения в опорах на основании данных о параметрах свободного выбега ротора, которая отличается более простой реализацией в сравнении с прямыми измерениями с применением датчиков крутящего момента. С применением процедур математико-статистической получены данные, подтверждающие расчётные характеристики спроектированных триботронных опор.

**Ключевые слова:** триботронная опора, активные подшипники, оптимальное проектирование, физический эксперимент, аппроксимация, момент трения.

### 1. Введение

Проектирование опор скольжения средне- и высокоскоростных роторных систем требует учета ряда ключевых характеристик: грузоподъемность, максимальное давление смазочного материала, массо-габаритные характеристики и т.д. [1]. Использование стандартных методик, основанных на упрощенных законах гидродинамики, термодинамики, прочностного анализа, позволяет получить достаточно усредненные характеристики опор, что приводит к уменьшению рабочих диапазонов частот роторной системы. Проектирование активных опор скольжения на основе применения продвинутых математических и имитационных моделей, а также новых математических методов, требует пересмотра применимости этих ключевых параметров [2,3]. В частности, использование в качестве основной характеристики грузоподъемности опоры в случае применения активного управления не является адекватным, так как грузоподъемность является переменной величиной. Момент трения, наряду с энергетической эффективностью и энергетическими потерями, может быть использовать как интегральная метрика при проектировании роторных систем [4,5].

Экспериментальное исследование характеристик вязкого трения жидкостных опор скольжения является активно развивающейся и актуальной областью научного знания. Изучение энергетических потерь активных гидростатодинамических подшипников скольжения требует современных методов изучения. Целью данной работы является экспериментальная проверка момента трения активных гибридных опор скольжения, спроектированных в рамках комплексного теоретико-экспериментального исследования по поиску новых методов структурно-параметрического синтеза триботронных опор [6-8].

### 2. Цели проведения экспериментальных исследований

Ранее в рамках проведения исследований гибридных подшипников жидкостного трения была выполнена процедура параметрического синтеза гидростатодинамического подшипника с прямоугольными камерами (рисунок 1).

Решение задачи параметрического синтеза заключалось в автоматизированном подборе геометрических характеристик подшипника скольжения, а именно величины среднего зазора подшипника, длины подшипника, длины и ширины гидростатических карманов, диаметра и длины канала подвода смазочного материала [9]. Для решения этой задачи были выбраны следующие целевые критерии: момент трения подшипника, как энергетическая характеристика; длительность переходного процесса, как характеристика динамической стабильности роторной системы; максимальное силовое воздействие, развиваемое подшипником, как параметр, отражающий потенциальную способность управления

положением ротора в подшипнике. Решение оптимизационной задачи было получено с применением эвристических методов, а именно генетического алгоритма и алгоритма роя частиц.

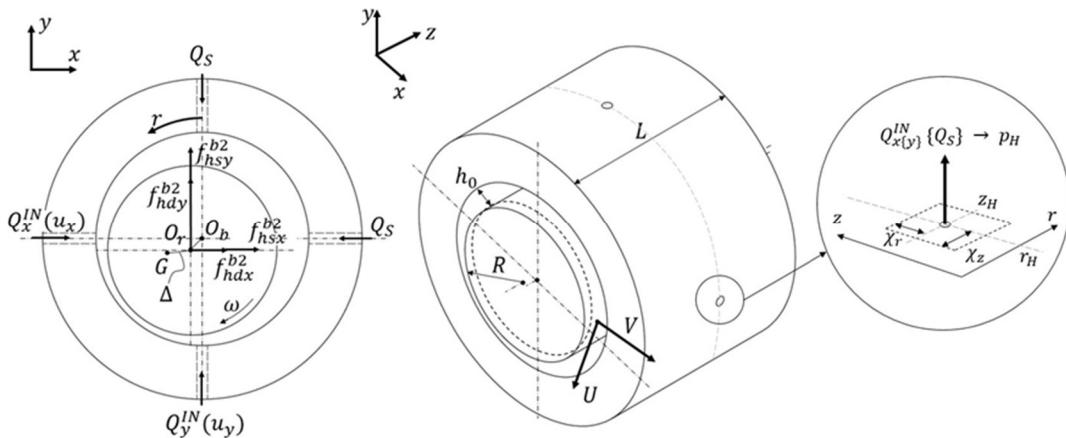


Рисунок 1 – Расчетная схема активного гидростатодинамического подшипника

Математическая модель исследуемой роторной системы включает модель жесткого ротора, модель подшипника скольжения, основанная на численном решении уравнения Рейнольдса, которое было модифицировано для учета гидростатических эффектов, возникающих в камерах подшипника и учета особенностей возможных форм зазоров подшипников [10]. Численное решение уравнения Рейнольдса было получено с использованием метода конечных разностей [11,12].

Результаты расчета представляют собой Парето-оптимальное множество. Для оценки полученных решений были выбраны четыре конфигурации (таблица 1). Три решения отражают наиболее выдающиеся характеристики, представленные целевыми функциями, а одно решение является сбалансированным сочетанием [10].

Таблица 1 – Параметры синтезированных конфигураций ТТО.

Параметр	Конф.1	Конф.2	Конф.3	Конф.4
Проектные (целевые) характеристики				
Момент трения $T_{fr}$ , Н·мм	18,1	9,7	10,2	8,7
Длительность переходного процесса $T_{tr}$ , мс	6,5	132	16,4	13,4
Максимальная управляющая сила $R_{max}$ , Н	1010	492	411	127
Конструктивные параметры				
Длина подшипника $L$ , мм	67	34	36,7	30,8
Радиальный зазор $h_0$ , мкм	69	68	67,5	68
Диаметр подводящего канала $d_h$ , мм	0,8	0,93	0,65	0,52
Длина подводящего канала $l_h$ , мм	12,5	12,4	12,2	13,3
Ширина питающего кармана $W_p$ , % от $L$	58	52,7	55,5	51
Ширина питающего кармана, мм	40,6	18,5	20	14,9
Глубина питающего кармана, мм	1,5			
Окружная протяженность питающего кармана $L_p$ , градусов	18,8	19,7	18,7	11,65

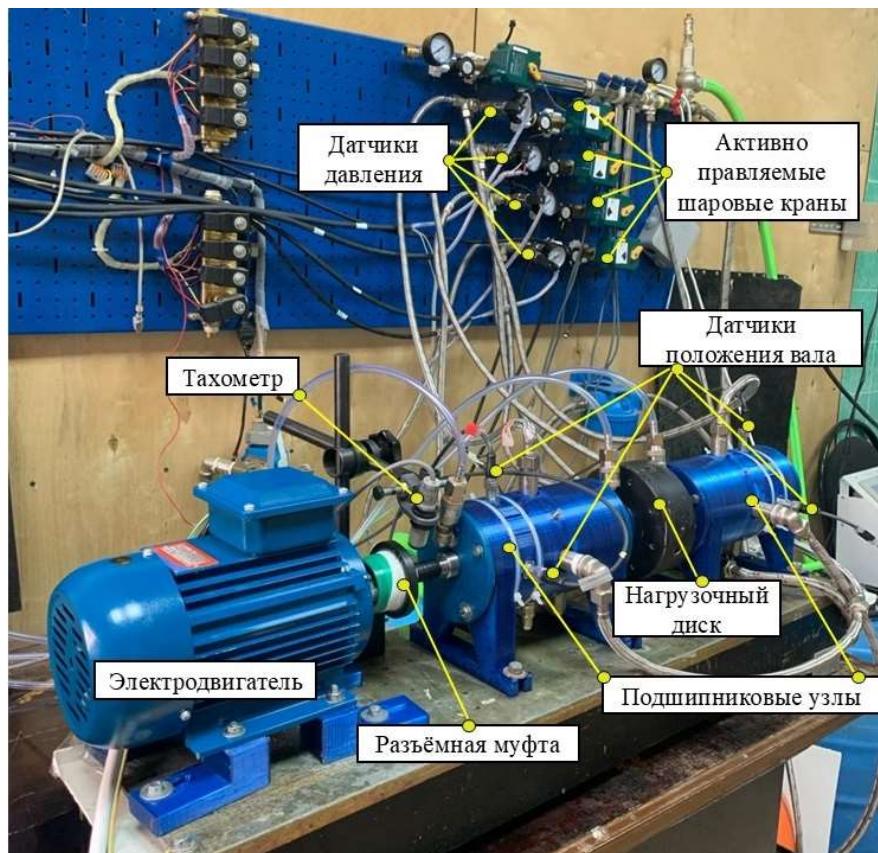
Конфигурация 1 обладает хорошей динамической стабильностью и управляемостью, в то время как конфигурация 2 имеет средние показатели трения и управляемости, но плохие динамические характеристики. Конфигурация 4, напротив, характеризуется низким трением, но плохой управляемостью. Вариант 3 представляет собой сбалансированное сочетание рассмотренных целевых параметров. Для всех трёх конфигураций глубина гидростатического кармана составляет 1,5 мм и выбирается с учётом обеспечения баланса между равномерностью

распределения давления смазочного материала по поверхности кармана и турбулизацией потоков, которые увеличиваются с увеличением глубины.

Представленная в данной статье методика измерений позволяет провести верификацию полученных расчетных данных в части трибологических характеристик спроектированных конфигураций триботронных опор и является развитием базовой методики экспериментальной оценки характеристик спроектированных подшипников, представленной в [13]. Примененная методика основывается на обработке данных о свободном выбеге ротора, а именно данных об изменении его скорости вращения в процессе его свободного замедления с рабочей частоты до полной остановки. Скорость замедления вала характеризует момент трения в подшипниках и рассчитывается аналитически, как показано ниже. По сравнению с прямым измерением момента трения посредством датчика крутящего момента согласно [13], данная методика менее требовательна к точности изготовления и сборки элементов экспериментального комплекса и обеспечивает в общем случае лучшую повторяемость результатов измерений.

### 3. Описание экспериментального комплекса

Для проведения эксперимента по определению момента трения в спроектированных гибридных подшипниках был спроектирован и собран стенд (рисунок 2), включающий в себя: электродвигатель с номинальной частотой вращения ниже собственных критических частот вала, разъемную муфту, ротор, опирающийся на два гидростатодинамических подшипника с прямоугольными питающими камерами, и закрепленный на роторе нагрузочный диск. Диаметр цапф вала составляет 40 мм, масса ротора в сборе с нагрузочным диском равна 9 кг. Конструкция стендда также обеспечивает равнное распределение веса ротора между двумя его опорами.

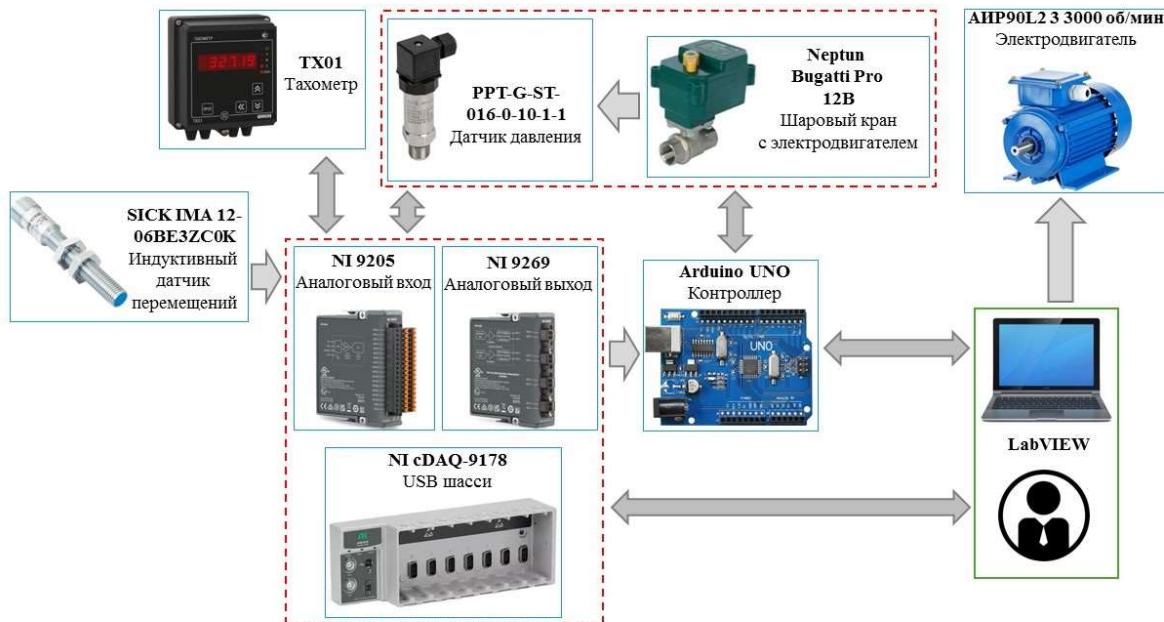


*Рисунок 2 – Экспериментальный стенд для исследования момента трения в активных гидростатодинамических подшипниках*

В разработанном стенде предусмотрена четырёхканальная система подачи смазочного материала в триботронные опоры с возможностью поканального автоматизированного

регулирования давления подачи смазочного материала [14]. Основными элементами данной системы являются шаровый кран с электродвигателем и датчик избыточного давления, расположенные в каждом из питающих каналов. Основной задачей проведённого эксперимента являлась косвенная оценка момента трения в спроектированных подшипниках путём измерения частоты вращения ротора после разъединения вала двигателя с ротором. Для этого в спроектированном стенде предусмотрено использование тахометра и разъёмной муфты, позволяющей без потерь разъединить валы во время вращения. Также в стенде используются бесконтактные воздушные уплотнения, что уменьшает общий момент трения трибоузла.

Ниже представлена информационно-измерительная система экспериментального стенда (рисунок 3).



*Рисунок 3 – Информационно-измерительная система экспериментального стенда для исследования момента трения в гидростатодинамических подшипниках скольжения*

Для измерения частоты вращения при выбеге ротора используется тахометр ОВЕН TX01. В информационно-измерительную систему входит описанный выше контур активного управления подачей смазочного материала в триботронные опоры, состоящий из датчика избыточного давления PPT-G-ST-016-0-10-1-1, шарового крана с электродвигателем Neptun Bugatti Pro 12V и контроллера. В качестве контроллера используется плата Arduino UNO с контроллером ATmega328. Контроллер принимает сигнал с датчика давления, сравнивает значение с заданной человеком-оператором уставкой и в зависимости от разницы значения давления в канале и уставкой посылает управляющий сигнал на электродвигатель шарового крана.

Уставка задаётся оператором в среде LabVIEW, заданный сигнал передаётся через цифро-аналоговый преобразователь NI 9269. Интерфейс программы позволяет также отслеживать значения с датчиков всей информационно-измерительной системы через аналого-цифровой преобразователь NI 9205. Для синхронизации работы и передачи данных модулей ввода и вывода и программы LabVIEW используется USB шасси NI cDAQ-9178. В информационно-измерительной системе дополнительно присутствуют индуктивные датчики перемещений Sick IMA 12-06BE3ZC0K для контроля положения ротора.

#### 4. Методика измерения и результаты

Исследование момента трения опор скольжения производилось путем измерения частоты вращения при выбеге ротора. Выбранный метод является косвенным в силу трудностей, связанных с использованием проточных датчиков момента и использованием

многокомпонентных корпусов и датчиков силы, которые позволили бы измерить момент проворачивания подвижного корпуса относительно неподвижной станины.

Последовательность проведения экспериментальных исследований подразумевала следующие этапы: 1) разгон ротора до частоты вращения 3000 об/мин, 2) отключение электродвигателя при помощи разъемной муфты, 3) остановка электродвигателя. На рисунке 4 представлены данные выбега ротора с рабочей частоты до останова.

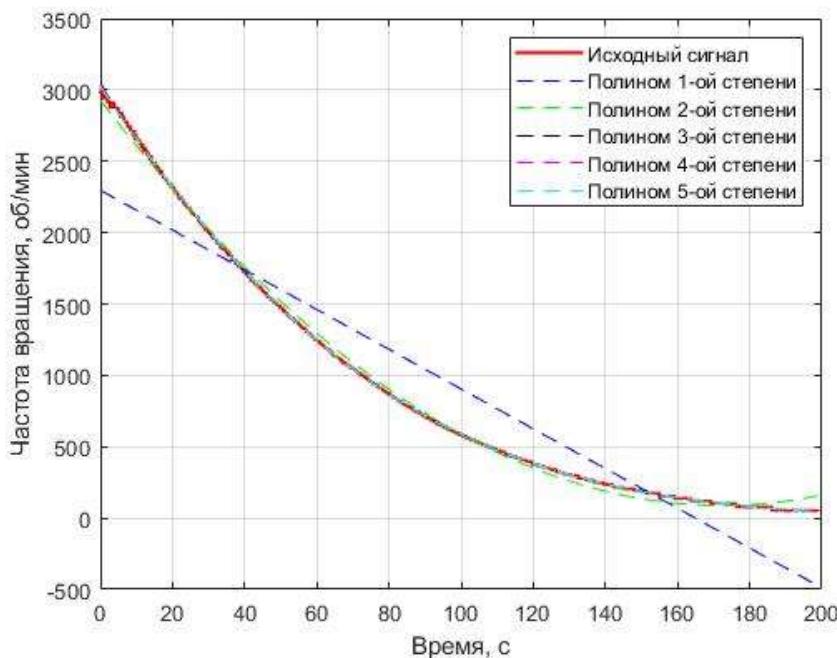


Рисунок 4 – Экспериментально полученная кривая выбега ротора и аппроксимационные кривые

Во время выбега на ротор действуют силы инерции и силы вязкого трения опор скольжения. Так как исследуемая частная область находится ниже первой критической частоты, было принято допущение, что ротор является жестким. Уравнение свободного движения жесткого ротора можно представить следующим образом:

$$I \frac{d\omega}{dt} = -2M \quad (1)$$

где  $I$  - момент инерции ротора,  $\omega$  - угловая скорость,  $M$  - момент вязкого трения опоры.

Момент инерции исследуемого ротора  $I = 1,347 \cdot 10^{-2}$  кг·м<sup>2</sup>. Так как момент трения в первой и второй опорах практически равны в силу равенства нагрузки на каждую опору. По стандартным соотношениям момент трения может быть рассчитан следующим образом:

$$M = -\frac{\pi I}{60} \frac{dn}{dt} \quad (2)$$

где  $n$  - частота вращения ротора.

Таким образом, момент трения может быть представлен как функция частоты вращения и времени. Данные, полученные при помощи тахометра, не подходят для прямой математической обработки, так как им свойственна неравномерность, которая связана с техническими особенностями тахометра. Для проведения процедуры обработки данных требуется замена исходных экспериментальных данных аппроксимирующими зависимостями. На рисунке 4 представлены результаты аппроксимации исходных данных выбега ротора полиномами 2-5 степени. Как видно на рисунке, полином третьей степени и выше достаточно точно повторяет форму исходных данных. Для проведения расчета момента трения использовалась стандартная процедура аппроксимации полиномом третьей степени [15].

На рисунке 5 представлены экспериментальные данные выбега ротора на различных

конфигурациях опор за 30 секунд. Выбранная продолжительность записываемого выбега обосновывается сравнением с расчетными данными, полученными для частоты вращения 3000 об/мин. Исследование частот ниже 2000 об/мин требовало дополнительных затрат экспериментального и вычислительного времени, а также затрат памяти, и не являлось целью данного исследования.

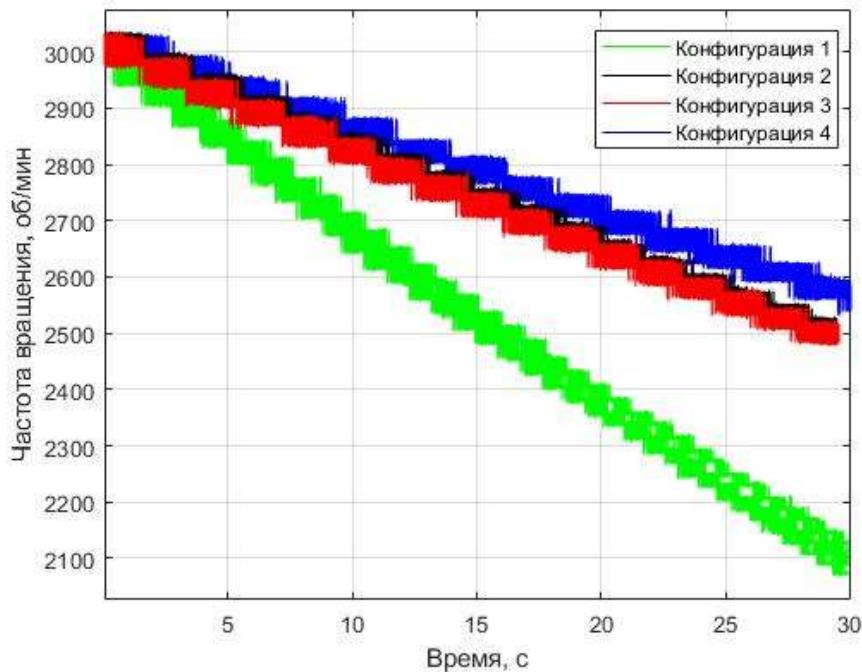


Рисунок 5 – Экспериментальные данные выбега ротора

В рамках эксперимента для каждой конфигурации подшипников были получены по восемь кривых выбега, их которых были убраны выпадающие данные. Конфигурация 1 показала самую низкую частоту вращения в конце периода измерений – около 2100 об/мин. Конфигурации 2 и 3 показали практически идентичные данные выбегов. Ротор в этих опорах выбегал до частоты 2500 об/мин. Ротор на подшипниках конфигурации 4 выбегал до скорости 2600 об/мин за 30 секунд. На рисунке 6 представлены результаты обработки экспериментальных данных.

Результаты математической обработки данных показали, что конфигурация 1 имеет самый высокий момент трения из представленных вариантов подшипников. На частоте вращения 3000 об/мин конфигурация 1 показала момент трения 24,5 Н·мм. Конфигурация 2 показала 13 Н·мм, конфигурация 3 – 13,5 Н·мм, конфигурация 4 – 11,4 Н·мм. Сводные данные приведены в таблице 2.

Отклонение экспериментальных данных от расчетных позволяет судить о наличии в исследуемой роторной системе дополнительного «потребителя» энергии. В качестве источника дополнительного трения можно рассматривать осевую опору, представляющую собой контакт игла-поверхность. Так как в исследуемой системе осевая опора не была предусмотрена, осевые колебания исключались за счет выставления горизонта с небольшим уклоном на электродвигатель и использования специального «шипа», выполняющего роль осевого подшипника.

Основным источником дополнительного трения можно считать недостаточную соосность подшипников. Несмотря на то, что соосность опор для каждого эксперимента выставлялась с использованием прибора Балтех Квант-ЛМ по ГОСТ 24643-81, изменение положения втулок подшипников в корпусах под действием гидродинамических и гидростатических сил могло вызывать увеличение общего момента трения опор.

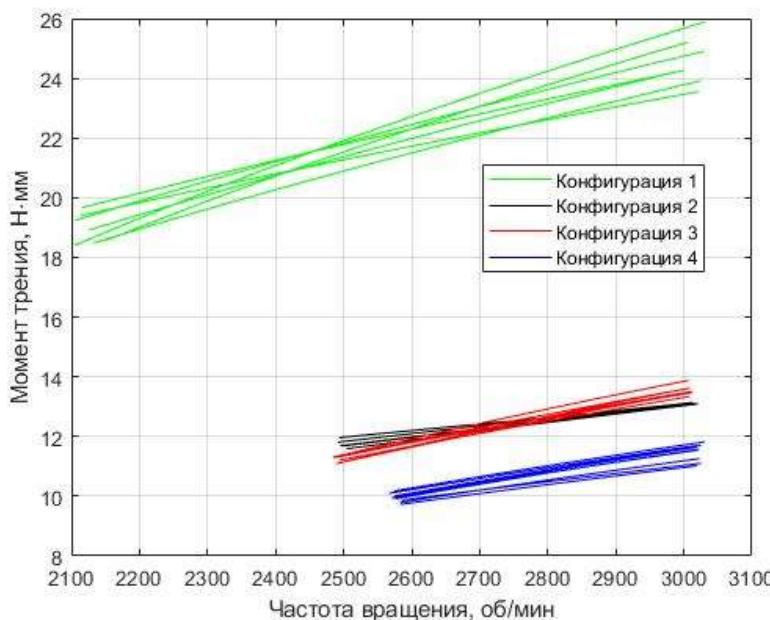


Рисунок 6 – Результаты расчета момента трения

Таблица 2 – Сравнение расчетных и экспериментальных значений момента трения.

	Конф.1	Конф.2	Конф.3	Конф.4
Расчетное значение момента трения $T_{fr}$ , Н·мм	18,1	9,7	10,2	8,7
Экспериментальное значение момента трения $T_{fr}$ , Н·мм	24,5	13	13,5	11,4
Отклонение, %	35,3	34	32,3	31

Также стоит отметить, что фактическая величина радиального зазора для изготовленных образов подшипников обличалась от рассчитанных. Это связано с учетом технологических допусков, погрешностей изготовления втулок подшипников и вала.

С учетом представленных факторов можно отметить, что отклонение экспериментальных от теоретических значений момента трения достаточно равномерно для всех представленных конфигураций. Этот факт позволяет говорить об адекватности разработанного подхода к параметрическому синтезу активных гибридных опор скольжения.

## 5. Выводы

В рамках данного исследования был спроектирован и собран экспериментальный стенд, позволяющий исследовать момент трения активных гибридных опор скольжения. В процессе теоретических изысканий были определены четыре конфигурации подшипников, по которым были изготовлены экспериментальные образцы. Экспериментальные исследования показали хорошую сходимость теоретических и экспериментальных результатов, несмотря на наличие в роторной системе источника дополнительного трения. Таким образом, полученные результаты подтвердили заявленные характеристики момента вязкого трения активных гибридных опор скольжения, а предложенный подход автоматизированного проектирования подобных опор показал свою адекватность.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00789, <https://rscf.ru/project/22-19-00789/>.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhang G. Design and optimization of fluid lubricated bearings operated with extreme working performances - A comprehensive review / Zhang G., Huang M., Chen G., Li J., Liu Y., He J., Z., Tang S., Cui H. // International Journal of Extreme Manufacturing. – 2024. – № 6 (2). – 10.1088/2631-7990/ad1825.

2. Onunka C. A stability optimization model for shaft rotor-bearing systems / Onunka C., Gobler H., Bright G. // African Journal of Science, Technology, Innovation and Development. – 2016. – № 8. – pp. 1-12.
3. Saruhan H. Optimum design of rotor-bearing system stability performance comparing an evolutionary algorithm versus a conventional method // International Journal of Mechanical Sciences. – 2006. – № 48. – pp. 1341-1351.
4. Shi T. Mathematical modeling and optimization of gas foil bearings-rotor system in hydrogen fuel cell vehicles / Shi T., Wang H., Yang W., Peng X. // Energy. – 2023. – № 290. – pp. 130129. – 10.1016/j.energy.2023.130129.
5. Roy L., Kakoty S. Groove location for optimum performance of three- And four-lobe bearings using genetic algorithm // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. – 2014. – № 229. – 10.1177/1350650114541253.
6. А.С. Фетисов Генетические алгоритмы для оптимального проектирования триботронных опор роторов / А.С. Фетисов, М.Г. Литовченко, Д.В. Шутин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологий. – 2023. - №4 (360). – С. 230-240.
7. Shutin, Denis, Fetisov, Alexander, Savin, Leonid Optimization of Journal Bearings Considering Their Adjustable Design and Rotor Dynamics. – 2023. - 10.1007/978-3-031-40459-7\_24.
8. А.С. Фетисов Многокритериальная оптимизация активных гибридных подшипников скольжения / А.С. Фетисов, М.Г. Литовченко, Д.В. Шутин // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2024. – №28 (1). – С. 8-26.
9. D. Shutin Optimization of journal bearings considering their adjustable design and rotor dynamics / D. Shutin, A. Fetisov, L. Savin // Proceedings of the 11<sup>th</sup> IFToMM International Conference on Rotordynamics. IFToMM 2023. Mechanisms and machine science. Springer. – 2023. – №2(140). – pp. 364-376.
10. A. Fetisov Application of evolutionary algorithms to the optimal design of non-circular actively lubricated bearings / Fetisov A., Litovchenko M., Shutin D // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2024. – 11 C. 68-76.
11. W.M. Dmochowski Difference Method for Fluid-Film Bearings / W.M. Dmochowski, A. Dadouche, M. Fillon // Encyclopedia of Tribology. – 2013. – pp 1137-1143.
12. L. San Andres Experimental identification of bearing force coefficients. – 2009.
13. А.С. Фетисов Экспериментальная оценка характеристик триботронных опор роторов / А.С. Фетисов, А.Ю. Родичев, М.Г. Литовченко, Д.В. Шутин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологий. – 2024. - №1 (363). С. 52-59.
14. М.Г. Литовченко Программно-аппаратная система полуактивной смазки триботронных опор жидкостного трения / М.Г. Литовченко, Д.В. Шутин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологий. – 2024. - №3 (365). С. 68-76.
15. MathWorks Help Center. Polyfit – Polynominal curve fitting. – URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/polyfit.html>.

**Фетисов Александр Сергеевич**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел  
Ассистент кафедры мехатроники, механики и  
робототехники  
E-mail: fetisov57rus@mail.ru

**Литовченко Максим Геннадьевич**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел  
Студент кафедры мехатроники, механики и  
робототехники  
E-mail: yamaks123@bk.ru

---

FETISOV A.S., LTOVCHENKO M.G.

## **EXPERIMENTAL VERIFICATION OF TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF TRIBOTRONIC BEARINGS BASED ON ROTOR FREE DECCELERATION DATA**

**Abstract.** The article presents the results of experimental studies of the friction moment of active hydrostatic-dynamic plain bearings. The results of solving the problem of parametric synthesis of active hybrid rotor supports using evolutionary algorithms, which include four configurations with different indicators of the viscous friction moment, are presented. A technique for conducting experimental measurements of the friction moment in supports based on data on the parameters of the free runout of the rotor is presented, which is characterized by a simpler implementation in comparison with direct measurements using torque sensors. Using mathematical and statistical procedures, data were obtained confirming the calculated characteristics of the designed tribotronic supports.

**Keywords:** tribotronic support, active bearings, optimal design, physical experiment, approximation, friction torque.

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Zhang G. Design and optimization of fluid lubricated bearings operated with extreme working performances - A comprehensive review / Zhang G., Huang M., Chen G., Li J., Liu Y., He J., Z., Tang S., Cui H. // International Journal

- of Extreme Manufacturing. – 2024. – № 6 (2). – 10.1088/2631-7990/ad1825.
2. Onunka C. A stability optimization model for shaft rotor-bearing systems / Onunka C., Gobler H., Bright G. // African Journal of Science, Technology, Innovation and Development. – 2016. – № 8. – pp. 1-12.
3. Saruhan H. Optimum design of rotor-bearing system stability performance comparing an evolutionary algorithm versus a conventional method // International Journal of Mechanical Sciences. – 2006. – № 48. – pp. 1341-1351.
4. Shi T. Mathematical modeling and optimization of gas foil bearings-rotor system in hydrogen fuel cell vehicles / Shi T., Wang H., Yang W., Peng X. // Energy. – 2023. – № 290. – pp. 130129. – 10.1016/j.energy.2023.130129.
5. Roy L., Kakoty S. Groove location for optimum performance of three- And four-lobe bearings using genetic algorithm // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. – 2014. – № 229. – 10.1177/1350650114541253.
6. A.S. Fetisov Genetic algorithms for the optimal design of tribotronic rotor supports / A.S. Fetisov, M.G. Litovchenko, D.V. Shutin // Fundamental and applied problems of engineering and technology. – 2023. - No. 4 (360). – pp. 230-240.
7. Shutin, Denis, Fetisov, Alexander, Savin, Leonid Optimization of Journal Bearings Considering Their Adjustable Design and Rotor Dynamics. – 2023. - 10.1007/978-3-031-40459-7\_24.
8. A.S. Fetisov Multi-objective optimization of active hybrid fluid film bearings using heuristic algorithms / A.S. Fetisov, M.G. Litovchenko, D.V. Shutin // Proceedings of the Southwest State University. – 2024. – № 28 (1). – pp. 8-26.
9. D. Shutin Optimization of journal bearings considering their adjustable design and rotor dynamics / D. Shutin, A. Fetisov, L. Savin // Proceedings of the 11<sup>th</sup> IFTOMM International Conference on Rotordynamics. IFTOMM 2023. Mechanisms and machine science. Springer. – 2023. – №2(140). – pp. 364-376.
10. A. Fetisov Application of evolutionary algorithms to the optimal design of non-circular actively lubricated bearings / Fetisov A., Litovchenko M., Shutin D // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2024. – 11 C.
11. W.M. Dmochowski Difference Method for Fluid-Film Bearings / W.M. Dmochowski A., Dadouche M. Fillon // Encyclopedia of Tribology. – 2013. – pp 1137-1143.
12. L. San Andres Experimental identification of bearing force coefficients. – 2009.
13. A.S. Fetisov Experimental estimation of characteristics tribotronic rotor supports / A.S. Fetisov, A. Yu. Rodichev, M.G. Litovchenko, D.V. Shutin // Fundamental and applied problems of engineering and technology. – 2024. - №1 (363). – pp 52-59.
14. M.G. Litovchenko Software and hardware system of semi-active lubrication tribotronic fluid friction supports / M.G. Litovchenko, D.V. Shutin // Fundamental and applied problems of engineering and technology. – 2024. - №3 (365). – pp. 68-76.
15. MathWorks Help Center. Polyfit – Polynominal curve fitting. – URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/polyfit.html>.

**Fetisov Alexander Sergeevich**

Orel State University,

Assistant of the Department of Mechatronics, Mechanics and Robotics

E-mail: fetisov57rus@mail.ru

**Litovchenko Maksim Gennadievich**

Orel State University

Student of the Department of Mechatronics, Mechanics and Robotics

E-mail: yamaks123@bk.ru

© Фетисов А.С., Литовченко М.Г., 2024

ПОЛЯКОВ Р.Н., ГОРИН А.В.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ВИБРОЗАЩИТНЫХ СИСТЕМ С УПРАВЛЯЕМЫМ ДЕМПФИРОВАНИЕМ

**Аннотация.** В статье рассматриваются подходы и методы при математическом и информационном моделировании колебательных процессов, возникающих при работе виброзащитных устройств транспортных средств. Предложена принципиальная схема рычажной релаксационной виброзащитной системы. Указаны основные эксплуатационные преимущества предложенной схемы. Изложены как теоретические основы математического моделирования, так и их применение в современных системах компьютерного моделирования.

**Ключевые слова:** математическая модель, преобразование Лапласа, демпфирующая сила, механические колебания.

### Введение

Механические колебания, возникающие в процессе функционирования транспортных средств, оказывают, как правило, негативные эффекты. Вибрации возникают как под действием вешних, так и под действием диссипативных сил, возникающих между элементами транспортного средства. Это проявляется в увеличенном износе, нагреве деталей, снижении точности позиционирования, уменьшении КПД, увеличении уровня шума. В свою очередь перечисленные выше факторы негативно влияют на обслуживающий персонал, что выражается в повышении усталости и возможности получения профессиональных заболеваний [1]. Следовательно, изучение, проектирование и совершенствование виброзащитных систем является чрезвычайно актуальным вопросом машиностроения. В свою очередь успешное выполнение работ по техническому обслуживанию и ремонту с минимальными затратами человеческого ресурса, энергии и материалов во многом зависит от того, насколько хорошо продуманы и оптимизированы исходные параметры механической системы [2, 3].

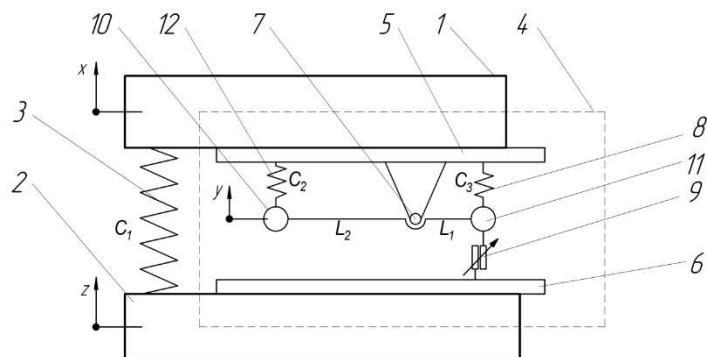
Одной из перспективных виброзащитных систем, обладающих ярко выраженной новизной, является рычажная релаксационная виброзащитная система с фрикционным демпфером. Предложенная рычажная релаксационная виброзащитная система сочетает в себе как виброизоляционный подход, так и метод применения динамического гасителя (антивибратора). Также система обладает следующими преимуществами: малые габариты, широкий диапазон регулируемых рабочих параметров, позволяющих обеспечить комфортную работу для различных устройств и условий, простота конструкции, обеспечивающая высокую ремонтопригодность и малую стоимость сервисного обслуживания, возможность применения на широком диапазоне возмущающих воздействий, быстрота срабатывания [4, 5].

### Основная часть

Предлагаемая рычажная релаксационная виброзащитная система с фрикционным демпфером (рисунок 1) включает в себя объект защиты 1, основание (источник вибрации) 2, несущий упругий элемент 3 и рычажная релаксационная подвеска 4. Релаксационная подвеска при помощи кронштейнов 5 и 6 соединена соответственно с объектом защиты 1 и основанием 2. На кронштейне 5 находится двухлечный рычаг 7. Правый конец рычага соединен с кронштейном 5 упругим элементом 8. Также правый конец рычага шарнирно соединен с управляемым фрикционным демпфером 9, который закреплен на кронштейне 6. На левом конце рычага для придания большего момента инерции закреплена дополнительная масса 10, а на левом дополнительная масса 11, так как центр тяжести рычага не находится на оси вращения, рычаг выступает в роли динамического гасителя (антивибратора). Левый конец рычага также соединен упругим элементом 12 с кронштейном 5.

Рассматриваемая рычажная релаксационная виброзащитная система с фрикционным демпфером в своем изучении требует математического моделирования, для расчета динамики и оптимизации параметров. Сложность расчета динамики рассматриваемой подвески заключается в невозможности пренебречь массой и моментом инерции рычага, а также

релейным законом работы демпфера. Массой упругих элементов и демпфера мы пренебрегаем.



*Рисунок 1 – Схема виброзащитной системы с фрикционным демпфером*

Также примем, что плечи рычага значительно превосходят амплитуду колебаний объекта защиты массой  $m$ , то есть пренебрегаем вертикальными отклонениями штока демпфера.

При дальнейшем рассмотрении приняты следующие обозначения:

$a = L_2 / L_1$  – отношение плеч рычага;

$L_1$  и  $L_2$  – плечи рычага;

$m$  – масса объекта защиты;

$M = I / L_1^2$  – приведенная к расчетной схеме масса рычага;

$I$  – момент инерции рычага;

$\mu = Lm_0 / L_1$  – приведенная к расчетной схеме масса рычага, характеризующая свойства антивибратора;

$L$  – расстояние от оси вращения до центра тяжести рычага;

$m_0$  – масса рычага;

$C_1$  – жесткость несущего упругого элемента;

$C_2$  и  $C_3$  – жесткости упругих элементов, установленных на правом и левом концах рычага;

$x$  – смещение объекта защиты;

$y$  – смещение конца рычага;

$z$  – смещение источника вибрации.

С учетом принятых обозначений, в качестве математической модели можем принять следующую систему дифференциальных уравнений [6, 7]:

$$\begin{cases} P_{\text{tp}} + \mu \ddot{x} - (C_2 a^2 + C_3) y - M \ddot{y} = 0, \\ P_{\text{tp}} + (C_3 - C_2 a) y + C_1(z - x) - m \ddot{x} = 0, \\ P_{\text{tp}} = P_0 \operatorname{sgn}(\dot{z} - \dot{y} - \dot{x}). \end{cases} \quad (1)$$

При проектировании транспортных средств можно выделить несколько целей разработки математических и программных моделей:

- объяснить выявить взаимосвязи между отдельными узлами транспортного средства;

- спрогнозировать поведение объекта в различных дорожных условиях, выработать на основании этого прогноза корректирующее управление воздействие;

- упростить проектирование и поиск оптимальных соотношений и параметров.

Для рассматриваемой задачи моделирования колебательных процессов в транспортном средстве необходимо определить перемещения отдельных его узлов. То есть возможно мысленно разбить рассматриваемую систему на компоненты и описать перемещение каждого

в отдельности. Затем определить взаимосвязи между компонентами. Окончательную модель можно графически представить в виде структурной схемы, где каждое звено задает дифференциальное уравнение движения определенного узла [8].

При этом целесообразно применить к рассматриваемым дифференциальным уравнениям преобразование

$$X(s) = \int_0^{\infty} x(t) e^{-st} dt \quad (1)$$

Преобразование Лапласа ставит в соответствие функцию-оригиналу действительной переменной  $t$  функцию-изображение комплексной переменной  $s$ . Таблицы преобразований Лапласа для различных функций можно найти в математических справочниках [9]. Различные системы компьютерного моделирования также часто оперируют не оригиналами функций, а их изображениями или передаточными функциями. Передаточная функция представляет из себя оператор, преобразующий входное воздействие в выходной параметр [10,11].

Подвеску транспортного средства можно условно представить следующим образом на тело массой  $m$ , соединенное с основанием, являющимся источником вибрации, пружиной жесткостью  $C$  и гидравлическим демпфером с коэффициентом демпфирования  $b$ , действует возмущающая сила  $P(t)$ . Также в системе будем учитывать сухое трение  $P_{\text{тр}} = P_0 \operatorname{sgn} \dot{x}$ .

Дифференциальное уравнение, описывающее движение системы

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + Cx = P(t) - P_0 \operatorname{sgn} \dot{x}. \quad (2)$$

Передаточная функция, определяющая перемещение груза под воздействием внешней силы при наличии упругого и вязкого сопротивления

$$W(s) = \frac{1}{ms^2 + bs + C}. \quad (3)$$

Составленная, исходя из выше сказанного, структурная схема представлена на рисунке 2, которую уже можно рассматривать как информационную модель. Здесь рассматриваются не физические воздействия между источником вибрации (дорожным полотном), подвеской и объектом виброзащиты, а информационные сигналы о этих взаимодействиях [12]. Релейное звено, включенное в отрицательную обратную связь, описывает трение в системе [13, 14].

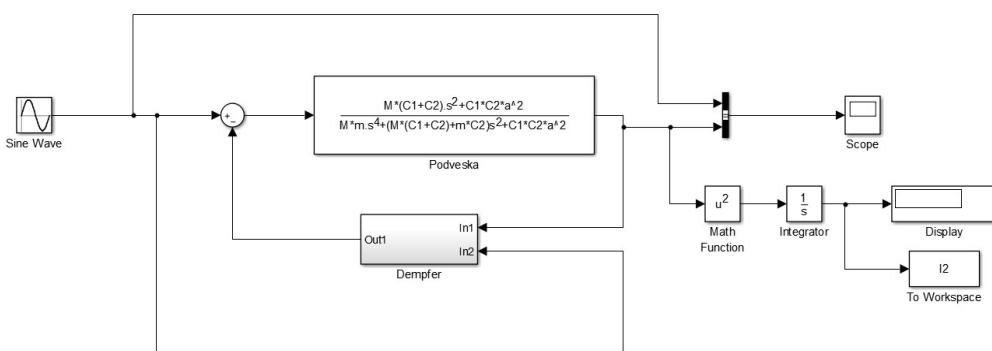


Рисунок 2 – Программная модель колебательной системы

В современных системах компьютерного моделирования (MATLAB, SciLab) математическая модель часто задается подобными структурными схемами, то есть возможно построение математической модели на графическом языке программирования [15, 16].

Улучшить виброзащитные свойства рассматриваемой системы возможно, применяя прерывистое демпфирование, то есть выключая из работы демпфер в нежелательные моменты времени. Такой режим возможен только при низких возмущающих частотах, так как скорость срабатывания демпфера ограничена. Однако при высоких частотах демпфер может быть выключен, а виброзащиту обеспечить один несущий упругий элемент. [17, 18]

Наиболее эффективна работа демпфера в те моменты времени, когда сила демпфирования направлена в противоположную сторону скорости движения объекта защиты

$\dot{x}$ . Направление же силы демпфирования, как следует из (1), определяется соотношением  $(\dot{z} - \dot{y} - \dot{x})$ .

Тогда условие включения демпфера в работу

$$\dot{x}(\dot{z} - \dot{y} - \dot{x}) < 0. \quad (4)$$

Правая часть неравенства (4) принимает положительные значения, когда оба сомножителя имеют одинаковый знак, если знаки  $\dot{x}$  и  $(\dot{z} - \dot{y} - \dot{x})$  противоположны (скорость и сила демпфирования разнонаправлены) произведение принимает отрицательные значения.

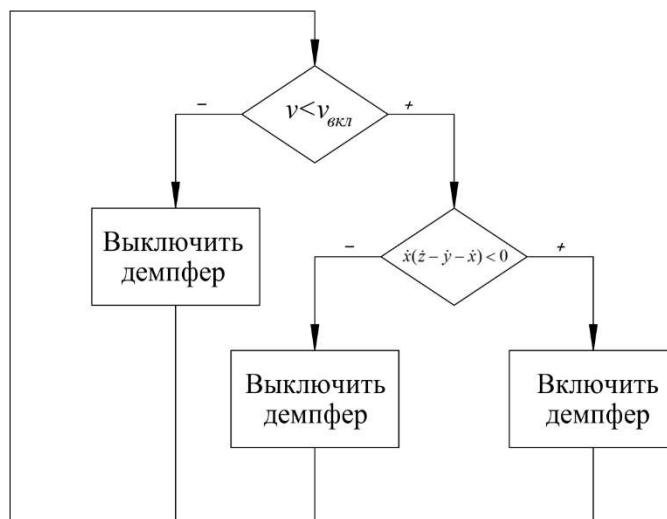


Рисунок 3 – Алгоритм срабатывания демпфера на каждом цикле опроса датчиков

На рисунок 3 представлен алгоритм работы демпфера. Если частота входных колебаний меньше некой близкой к резонансной частоты включения, проверяется условие (4) и принимается решение о включении или выключении демпфера.

Для реализации управляемого демпфирования необходимо получать информацию о скорости объекта защиты  $\dot{x}$  и скорости штока относительно прижимов  $(\dot{z} - \dot{y} - \dot{x})$ . Значения этих параметров можно получить используя индуктивные датчики.

Индуктивные датчики (рисунок 4) служат для бесконтактного получения информации о перемещениях рабочих органов машин, механизмов и преобразования этой информации в электрический сигнал.



Рисунок 4 – Принцип действия индукционного датчика

Принцип действия индуктивного датчика основан на изменении индуктивности обмотки на магнитопроводе в зависимости от положения отдельных элементов магнитопровода (якоря, сердечника и др.). В таких датчиках линейное или угловое перемещение преобразуется в изменение индуктивности датчика. Применяются для измерения угловых и линейных перемещений, деформаций, контроля размеров и т.д.[19, 20]

Исходя из вышесказанного, программную модель управляемого демпфера сухого трения можно представить в следующем виде (рисунок 5)

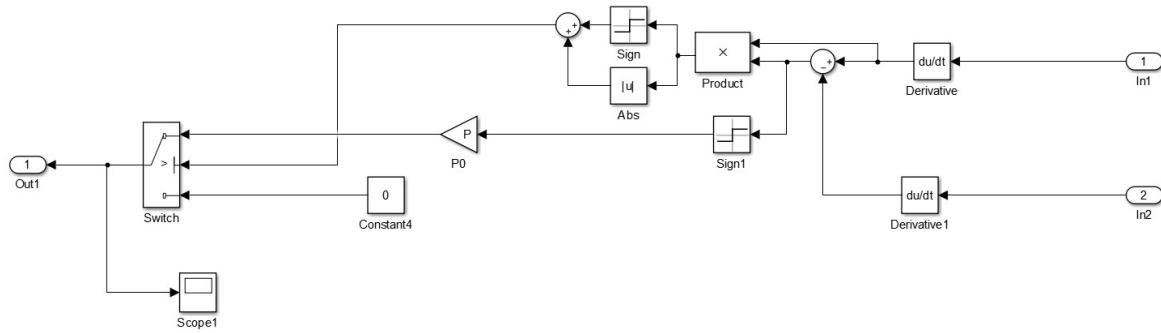


Рисунок 5 – Программная модель демпфера

Результаты моделирования демпфера сухого трения без управления и с применением активного управления представлены на рисунке 6 в виде фазовых траекторий. По оси  $x$  откладывается отклонение от положения равновесия, по оси  $y$  скорость объекта виброзащиты. Анализируя результат можно сделать вывод об эффективности применения активного управления демпфированием.

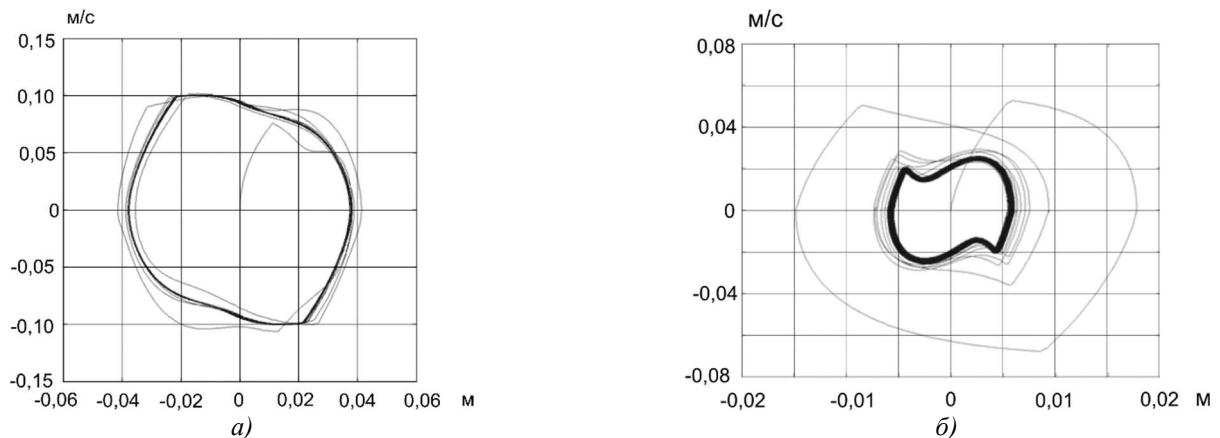


Рисунок 6 – Результаты моделирования

### Выводы

Полученные результаты дают возможность сформулировать общие принципы моделирования динамических систем:

- сложная механическая система разбивается на несколько взаимосвязанных элементов;
- каждый элемент описывается простым дифференциальным уравнением или функциональной зависимостью (элементы представляются отдельными звеньями на структурной схеме);
- используя численные методы и программные средства моделирования, согласно структурной схеме последовательно производятся необходимые вычисления;
- при необходимости проводится оптимизация параметров, а также вводятся элементы активного управления.

*Работа выполнена в ОГУ им. И.С. Тургенева в рамках государственного задания № 075-00196-24-08 на 2024 год и на плановый период 2025 и 2026 годов от 23.08.2024 г., проект 1024041900021-8-2.3.1;2.2.3 Разработка конструкторских и программно-аппаратных решений управления вибрационными процессами в вертолётном транспорте, обеспечивающих формирование оптимальных компенсационных воздействий (FSGN-2024-0013).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блехман, И. И. Вибрационная механика [Текст]/ И.И. Блехман. – М.: Физматлит, 1994. – 400 с.
2. Романченко М. К., Пахомова Л. В. Защита человека от низкочастотной вибрации / Saarbrucken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. – 132 с.

3. Гребеньков С.В. и др. Гигиена и охрана труда водителей в Санкт-Петербурге / С.В. Гребеньков, Е.В. Милутка, Л.Е. Дедкова и др. // Матер. X Всероссийского конгресса «Профессия и здоровье». Москва, 6–8 декабря 2011 г. М., 2011. С. 132–133.
4. Климов, А.В. Динамика рычажной релаксационной подвески с прерывистым демпфированием: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06 / А.В. Климов. – Орел, 2001. – 115 с.
5. Белозерова, Е.Б. Повышение эффективности виброзащиты виброактивного оборудования за счет прерывистого демпфирования: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06 / Е.Б. Белозерова. – Орел, 2012. – 184 с.
6. Климов, А.В. Влияние массы рычага на динамические характеристики рычажной релаксационной виброзащитной системы / А.В. Климов // Сб. науч. тр., Т.9. – Орел: ОрелГТУ, 1997. – С.156-158.
7. Фоминова, О.В. Динамика виброзащитной системы с фрикционным демпфером прерывистого действия: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06 / О.В. Фоминова. – Орел, 2003. – 172 с.
8. Черных, В.И. SIMULINK: Среда создания инженерных приложений / В.И. Черных; под общ. ред. В.Г. Потемкина. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. – 496 с.
9. Бёрд, Дж. Инженерная математика: Карманный справочник: Пер. с англ/Дж. Бёрд. – М.: Издательский дом "Додэка-ХХI", 2008. – 544 с.
10. Болотник, Н.Н. Оптимизация амортизационных систем / Н.Н. Болотник. – М.: Наука, 1983. – 256 с.
11. Теория автоматического управления: Учеб. для вузов по спец. "Автоматика и телемеханика". В 2-х ч. Ч. I. Теория линейных систем автоматического управления / Н.А. Бабаков, А.А. Воронов, А.А. Воронова; под ред. А.А. Воронова. – М.: Высшая школа, 1986. – 367 с.
12. Бенькович, Е.С. Практическое моделирование динамических систем / Е.С. Бенькович, Ю.Б. Колесов, Ю.Б. Сениченков. – СПб.: ВХБ-Петербург, 2002. – 464 с.
13. Смирнов, Г.А. Теория движения колесных машин / Г.А. Смирнов. – М.: Машиностроение, 1990. – 352 с.
14. Кондрашов, В. Е. MATLAB как система программирования научно-технических расчетов / В.Е. Кондрашов, С.Б. Королев. – М.: Мир, 2002. – 350 с.
15. Герман-Галкин, С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК/С.Г. Герман-Галкин. – СПб.: КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.
16. Алексеев, Е.Р. Scilab: Решение инженерных и математических задач / Е.Р. Алексеев, О.В. Чеснокова, Е.А. Рудченко. – М: ATL Linux; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 269 с.
17. Волгин, Л.Н. Оптимальное дискретное управление динамическими системами / Л.Н. Волгин. – М.: Наука, 1986. – 250 с.
18. Чернышев, В.И. Основы теории виброзащитных систем с непрямым импульсным управлением / В.И. Чернышев // Материалы международного научного симпозиума «Механизмы и машины ударного, периодического и вибрационного действия». – Орел: ОрелГТУ, 2000. – С. 163-167.
19. Фрайден, Дж. Современные датчики. Справочник / Дж. Фрайден. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
20. Джексон, Р.Г. Новейшие датчики / Р.Г. Джексон. – М.: Техносфера, 2007. – 384 с.

**Поляков Роман Николаевич**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел  
Доктор. техн. наук, профессор,  
Заведующий кафедрой мехатроники,  
механики и робототехники  
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 29  
E-mail: romanpolak@mail.ru

**Горин Андрей Владимирович**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел  
Доцент кафедры мехатроники, механики и  
робототехники  
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 29  
E-mail: gorin57@mail.ru

---

POLYAKOV R.N., GORIN A.V.

## **SIMULATION OF THE OPERATION OF VIBRATION PROTECTION SYSTEMS IN VEHICLES WITH CONTROLLED DAMPING**

**Abstract.** The article discusses approaches and methods for mathematical and information modeling of oscillatory processes that occur during the operation of vehicle vibration protection devices. A schematic diagram of a lever relaxation vibration protection system is proposed. The main operational advantages of the proposed scheme are indicated. Both the theoretical foundations of mathematical modeling and their application in modern computer modeling systems are outlined.

**Keywords:** mathematical model, Laplace transform, damping force, mechanical oscillations.

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Blekhman, I. I. Vibration Mechanics [Text] / I. I. Blekhman. - M.: Fizmatlit, 1994. - 400 p.

2. Romanchenko M. K., Pakhomova L. V. Human Protection from Low-Frequency Vibration / Saarbrucken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. - 132 p.
3. Grebenkov S. V. et al. Occupational Health and Safety of Drivers in St. Petersburg / S. V. Grebenkov, E. V. Milutka, L. E. Dedkova et al. // Proceedings of the 10th All-Russian Congress "Profession and Health". Moscow, December 6-8, 2011 M., 2011. Pp. 132-133.
4. Klimov, A. V. Dynamics of a lever-type relaxation suspension with intermittent damping: dis. ... candidate of technical sciences: 01.02.06 / A.V. Klimov. – Orel, 2001. – 115 p.
5. Belozerova, E.B. Increasing the efficiency of vibration isolation of vibroactive equipment due to intermittent damping: dis. ... candidate of technical sciences: 01.02.06 / E.B. Belozerova. – Orel, 2012. – 184 p.
6. Klimov, A.V. Influence of the lever mass on the dynamic characteristics of a lever-type relaxation vibration protection system / A.V. Klimov // Coll. scientific papers, Vol. 9. – Orel: OrelSTU, 1997. – P. 156-158.
7. Fominova, O.V. Dynamics of a vibration protection system with an intermittent friction damper: dis. ... Cand. of Engineering Sciences: 01.02.06 / O.V. Fominova. - Orel, 2003. - 172 p.
8. Chernykh, V.I. SIMULINK: Environment for creating engineering applications / V.I. Chernykh; under the general editorship of V.G. Potemkin. - Moscow: DIALOG-MIFI, 2003. - 496 p.
9. Bird, J. Engineering Mathematics: Pocket Reference: Trans. from English / J. Bird. - Moscow: Publishing House "Dodeka-XXI", 2008. - 544 p.
10. Bolotnik, N.N. Optimization of shock-absorbing systems / N.N. Bolotnik. - M.: Nauka, 1983. - 256 p.
11. Theory of automatic control: Textbook for universities in the specialty "Automation and telemetry". In 2 parts. Part I. Theory of linear automatic control systems / N.A. Babakov, A.A. Voronov, A.A. Voronova; edited by A.A. Voronov. - M.: Vysshaya shkola, 1986. - 367 p.
12. Benkovich, E.S. Practical modeling of dynamic systems / E.S. Benkovich, Yu.B. Kolesov, Yu.B. Senichenkov. - SPb.: VHB-Petersburg, 2002. - 464 p.
13. Smirnov, G.A. Theory of motion of wheeled machines / G.A. Smirnov. – M.: Mashinostroenie, 1990. – 352 p.
14. Kondrashov, V. E. MATLAB as a programming system for scientific and technical calculations / V.E. Kondrashov, S.B. Korolev. – M.: Mir, 2002. – 350 p.
15. German-Galkin, S.G. Matlab & Simulink. Design of mechatronic systems on a PC / S.G. German-Galkin. – St. Petersburg: KORONA-Vek, 2008. – 368 p.
16. Alekseev, E.R. Scilab: Solving engineering and mathematical problems / E.R. Alekseev, O.V. Chesnokova, E.A. Rudchenko. – M: ATL Linux; BINOM. Knowledge Laboratory, 2008. – 269 p.
17. Volgin, L.N. Optimal discrete control of dynamic systems / L.N. Volgin. - M.: Nauka, 1986. - 250 p.
18. Chernyshev, V.I. Fundamentals of the theory of vibration protection systems with indirect pulse control / V.I. Chernyshev // Proceedings of the international scientific symposium "Mechanisms and machines of impact, periodic and vibration action". - Orel: OrelSTU, 2000. - P. 163-167.
19. Fryden, J. Modern sensors. Handbook / J. Fryden. - M.: Tekhnosfera, 2005. - 592 p.
20. Jackson, R.G. The latest sensors / R.G. Jackson. - M.: Tekhnosfera, 2007. - 384 p.

**Polyakov Roman Nikolaevich**

Orel State University named after I.S. Turgenev  
Doctor of technical Sciences, professor of the  
department mechatronics, mechanics and robotics  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: romanpolak@mail.ru

**Gorin Andrei Vladimirovich**

Orel State University  
Associate professor of the department mechatronics,  
mechanics and robotics  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: gorin57@mail.ru

ГРИБАНОВ Е.Н., ЮШКОВА Э.Ю., РОДИЧЕВ А.Ю., АНАНЬКО А.С., РОДИЧЕВА И.В.

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ ХИМИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ВОД, СОДЕРЖАЩИХ ОРГАНИЧЕСКИЕ ТОКСИКАНТЫ, ДЛЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ**

**Аннотация.** В работе показана возможность применения искусственных нейронных сетей для определения концентрации токсикантов органической природы (нефть и нефтепродукты, поверхностно-активные вещества, жиры, фенол) в модельных водных системах. Для этого создана база спектров 150 многокомпонентных модельных водных растворов с различной концентрацией определяемых веществ, включающая 3600 реперных точек. На основе данной базы проведено обучение нейросети, определена значимость каждого входного параметра. Показана возможность анализа аналитического сигнала с помощью нейронной сети при определении токсикантов, изучаемых в работе, при их одновременном присутствии. Рассчитано относительное стандартное отклонение для нефтепродуктов, жиров, поверхностно-активных веществ и фенола на основе всего обучающего множества нейронной сети, которое составило, соответственно 0,12; 0,14, 0,12; 0,07. Полученные данные представляют интерес при автоматизации работы роботизированных систем при необходимости принятия решений в зависимости от химического состава окружающей среды, содержащей органические токсиканты.

**Ключевые слова:** нейронная сеть, химический анализ, автоматизация, роботизированные системы.

### **Введение.**

Нейронные сети благодаря возможности обучаться на основе предшествующего опыта способны успешно адаптироваться к изменениям окружающей среды и сценариям, что особенно важно в мехатронных и робототехнических системах, где реальные условия эксплуатации разнообразны и непредсказуемы [1-3]. Благодаря возможности применения ИИ для обработки большого массива неструктурированных данных, в частности, получаемых от сенсорных систем в режиме реального времени нейронные сети находят широкое применение при создании автоматизированных систем, направленных на решение задач химического анализа объектов окружающей среды [4-7].

При анализе реальных объектов нейронные сети позволяют построить нелинейные многопараметрические зависимости для сенсорной системы, интерпретация аналитического сигнала от которой классическими подходами затруднена, т.к. наблюдается перекрывание аналитических сигналов всех компонентов анализируемого объекта. Кроме того, в классическом подходе определение химического состава реальных объектов сопряжено с необходимостью предварительного разделения компонентов, что увеличивает время проведения химического анализа и усложняет его. Нейронные сети позволяют решить данные проблемы путем интерпретации интегрального аналитического сигнала от всех компонентов системы, обеспечивая роботизированным системам возможность адекватного и оперативного принятия решений. Отметим, что необходимость химического анализа большого массива проб (до нескольких тысяч) вручную для обучения нейронной сети, отсутствие четких критериев к формированию обучающей выборки затрудняют развитие методов машинного обучения, ограничивающих их внедрение в практику химического анализа.

Целью настоящей работы явилось систематическое изучение возможности анализа результатов спектрофотометрического определения модельных органических веществ в сложных многокомпонентных системах с помощью нейронных сетей для дальнейшего применения в дизайне и конструировании автоматических роботизированных систем.

**Материалы и методы.** В качестве модельных токсикантов выбраны вещества наиболее часто поступающие в сточные воды [8-11]: нефть и нефтепродукты (нефрас С4-155/200), поверхностно-активные вещества (Fairy), растительные масла, фенол. Химический состав токсикантов приведен в [12-14]. Концентрации компонентов в водных системах

выбраны исходя из значения их предельно допустимых концентраций (ПДК) и не превышали данный параметр в модельных растворах [15].

Спектры поглощения изучаемых систем регистрировали на спектрофотометре СФ-56. Для анализа данных и обучения использовали нейромедиатор NeuroPro 0.25 [16].

### **Результаты и обсуждение.**

В работе создана десятислойная нейронная сеть прямого распространения. Входной слой состоял из 24 нейронов, что соответствовало реперным точкам (длины волн) в спектрах поглощения, изучаемых многокомпонентных систем. Выходной слой насчитывал 4 нейрона, которые соответствовали концентрациям каждого из компонентов системы. Количество нейронов на всех скрытых слоях подбиралось экспериментально [17-18]. Количество нейронов на каждом слое указано в таблице 1.

Таблица 1 – Количество нейронов в слоях нейросети

Слой нейросети	Входной	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й	8-й	9-й	10-й	Выходной
Кол-во нейронов	24	25	50	50	50	50	50	100	100	100	100	4

Погрешность полей выводных данных устанавливали в соответствии с погрешностью измерительного прибора, которая составляет  $\pm 0,05$ . Требуемая точность не должна превосходить погрешности получения сигнала. Таким образом, погрешности вывода данных составляли  $\pm 0,001$ ;  $\pm 0,01$ ,  $\pm 0,0105$ ,  $\pm 0,00105$ , соответственно, для нефтепродуктов, жиров, ПАВ и фенола.

Обучение нейронной сети происходило по алгоритму обратного распространения ошибки, который заключается в предсказании нейросетью определённого ответа и коррекции ошибок на каждом новом цикле обучения [19].

Первым этапом обучения являлось предобработка входных полей базы данных с обучающей выборкой. Дальнейшие действия нейросети сводились к расчётом синдромов (возбуждение синапсов) каждого из уровней (скрытых слоёв нейронной сети). Количество уравнений синдромов соответствовало количеству нейронов на каждом скрытом слое. При этом, на синдромах последующих слоёв преобразуются части уравнений синдромов из предыдущих слоёв. Количество конечных синдромов эквивалентно количеству нейронов на выходном слое нейронной сети.

Следующий этап обучения нейросети заключался в постобработке конечных синдромов, при завершении которого нейросеть выдавала готовый ответ. Если он не входил в допустимые параметры погрешности вывода данных, то пример считался решённым неправильно и нейросеть начинала новый цикл обучения. Цикличность обучения продолжалась до тех пор, пока средняя ошибка нейросети не достигала минимального значения, т.е. количество правильно решённых примеров составляло 100%. В работе при обучении нейронной сети произведено более 59000 циклов обучения. В качестве примера, на рисунке 1 приведено окно ответов нейронной сети на тестовую выборку.

Анализируя значимость входных сигналов полей, нами обнаружено, что наибольшее влияние оказывают входные данные соответствующие значениям оптической плотности анализируемых систем при длинах волн: 220 нм, 330 нм, 450 нм, 540 нм и 640 нм. В наименьшей степени влияют входные значения при длинах волн: 480 нм, 570 нм, 600 нм и 700

ним. Данные результаты можно связать с природой изучаемых систем и спектрами их поглощения.

Рассчитанная константа Липшица [20] для данной нейросети равна 71,51 при норме векторов выходных сигналов 0,0282.

NeuroPro 0.25 - [Тестирование SPECTR]													
Файл Правка Окно Help													
Nº	N25	Прогноз сети	Ошибка	N26	Прогноз сети	Ошибка	N27	Прогноз сети	Ошибка	N28	Прогноз сети	Ошибка	
121	0,004	0,002636002	0,001363998	0,04	0,04913016	-0,00913016	0,04	0,03275028	0,007249718	0,0008	0,0009315916	-0,0001315916	
122	0,004	0,003454097	0,0005459034	0,04	0,04255459	-0,002554595	0,04	0,0346637	0,005336297	0	0,0007437727	-0,0007437727	
123	0,004	0,002630869	0,001369131	0	0,005425611	-0,005425611	0,04	0,0488588	-0,008858803	0,0008	0,0008450783	-4,507826E-5	
124	0	0,0005649233	-0,0005649233	0,04	0,04534977	-0,005349769	0,04	0,03091689	0,00908311	0,0008	0,0005107702	0,0002892298	
125	0,004	0,00261216	0,00138784	0	-0,002236819	0,002236819	0	0,009173496	-0,009173496	0	0,0006137572	-0,0006137572	
126	0	0,000105999	-0,000105999	0,04	0,03865665	0,001343348	0	-0,001220145	0,001220145	0	0,0002861165	-0,0002861165	
127	0	0,001035519	-0,001035519	0	-0,00406383	0,00406383	0,04	0,03068382	0,009316179	0	0,0004996207	-0,0004996207	
128	0	0,001369138	-0,001369138	0	-0,007846227	0,007846227	0	0,009321534	-0,009321534	0,0008	0,0007551575	4,484251E-5	
129	0,004	0,003291064	0,0007089358	0,04	0,03133977	0,008660028	0	0,003049779	-0,003049779	0	0,0006469088	-0,0006469088	
130	0,004	0,002630064	0,001369936	0	0,008621428	-0,008621428	0,04	0,03148067	0,00851933	0	-0,0003106725	0,0003106725	
131	0,004	0,003889006	0,0001109941	0	0,009760699	-0,009760699	0	-0,00491158	0,00491158	0,0008	0,0009672866	-0,0001672866	
132	0	0,0004488874	-0,0004488874	0,04	0,03817305	0,001826954	0,04	0,03520053	0,004799471	0	0,0003702846	-0,0003702846	
133	0	0,001264364	-0,001264364	0,04	0,03083585	0,009164148	0	0,009143443	-0,009143443	0,0008	0,0005066688	0,0002933312	
134	0	0,0009744182	-0,0009744182	0	-0,004524569	0,004524569	0,04	0,0308626	0,009137404	0,0008	0,0009184009	-1,840088E-5	
135	0,004	0,003784218	0,002157824	0,04	0,03045307	0,009546933	0	0,009269359	-0,009269359	0,0008	0,000982379	-0,000182379	
136	0,001	0,00234774	-0,00134774	0,002	0,01116567	-0,009165671	0,08	0,07534611	0,04653888	0,0008	0,001715636	-0,0009156361	
137	0,001	0,0007870429	0,0002129571	0,002	0,00313149	-0,00113149	0,08	0,08151215	-0,001512146	0	0,0008223928	-0,0008223928	
138	0,001	0,0008939188	0,0001060812	0	-0,008487549	0,008487549	0,08	0,07087097	0,009129027	0,0008	0,0002949827	0,0005050173	
139	0	0,001365012	-0,001365012	0,002	0,006417603	-0,004417603	0,08	0,080805756	-0,008057555	0,0008	0,0008474339	-4,743387E-5	
140	0,001	0,0006384552	0,0003615448	0,002	0,00263927	-0,0006392697	0	-0,006375169	0,006375169	0	0,0001310129	-0,0001310129	
141	0,001	0,001142398	-0,0001423976	0	0,0003516316	-0,0003516316	0,08	0,07088511	0,009114886	0	0,0003078493	-0,0003078493	
142	0,001	0,001744459	-0,000744459	0	0,008122589	-0,008122589	0	0,009106607	-0,009106607	0,0008	-3,052139E-5	0,00080305214	
143	0	0,001371808	-0,001371808	0,002	-0,003103261	0,005103261	0,08	0,07086032	0,009139681	0	0,0009003231	-0,0009003231	
144	0	0,001116675	-0,001116675	0,002	0,01120444	-0,009204443	0	-0,002424726	0,002424726	0,0008	0,0009004679	-0,0001004679	
145	0	0,001379363	-0,001379363	0	-0,001330562	0,001330562	0,08	0,07063465	0,009365352	0,0008	0,0001730424	0,0006269576	
146	0,001	0,002357171	-0,001357171	0,002	-0,00732409	0,00932409	0	-0,008981056	0,008981056	0,0008	0,0008005975	-5,974814E-7	
147	0,001	0,0006000075	0,0003999925	0	-9,0909E-5	9,0909E-5	0	0,007986104	-0,007986104	0	0,0003722412	-0,0003722412	
148	0	0,001083622	-0,001083622	0,002	0,002193992	-0,000193992	0	0,00512352	-0,00512352	0	5,11086E-6	-5,11086E-6	
149	0	0,0009878011	-0,0009878011	0	-0,0004979086	0,0004979086	0,08	0,07084785	0,009152154	0	0,0004086159	-0,0004086159	
150	0	0,001363873	-0,001363873	0	0,009114807	-0,009114807	0	0,009126408	-0,009126408	0,0008	0,0001630008	0,0006369991	
		Правильно: 150 (100%)	Правильно: 150 (100%)		Правильно: 150 (100%)	Правильно: 150 (100%)		Правильно: 150 (100%)	Правильно: 150 (100%)		Правильно: 150 (100%)	Правильно: 150 (100%)	
		<b>Неправильно: 0 (0%)</b>	<b>Неправильно: 0 (0%)</b>		<b>Неправильно: 0 (0%)</b>	<b>Неправильно: 0 (0%)</b>		<b>Неправильно: 0 (0%)</b>	<b>Неправильно: 0 (0%)</b>		<b>Неправильно: 0 (0%)</b>	<b>Неправильно: 0 (0%)</b>	
		Всего: 150	Всего: 150		Всего: 150	Всего: 150		Всего: 150	Всего: 150		Всего: 150	Всего: 150	
		Ср.ошибка: 0,0008251618	Ср.ошибка: 0,004921833		Ср.ошибка: 0,006239951	Ср.ошибка: 0,0005624937		Макс.ошибка: 0,01031362	Макс.ошибка: 0,01051673		Макс.ошибка: 0,0001630008	Макс.ошибка: 0,0006369991	
		Макс.ошибка: 0,00138784	Макс.ошибка: 0,01069607		Макс.ошибка: 0,01031362	Макс.ошибка: 0,01051673							

**Рисунок 1 – Окно ответов нейронной сети при обучении на тестовой выборке**

Тестиирование обученной нейронной сети проводилось на выборке, состоящей из 25 растворов, не входивших в обучающий массив проб. Тестовая выборка представляла из себя рабочие растворы анализаторов, которые приготовлены из маточных растворов в день анализа. Концентрации рабочих и маточных растворов приведены в таблице 2.

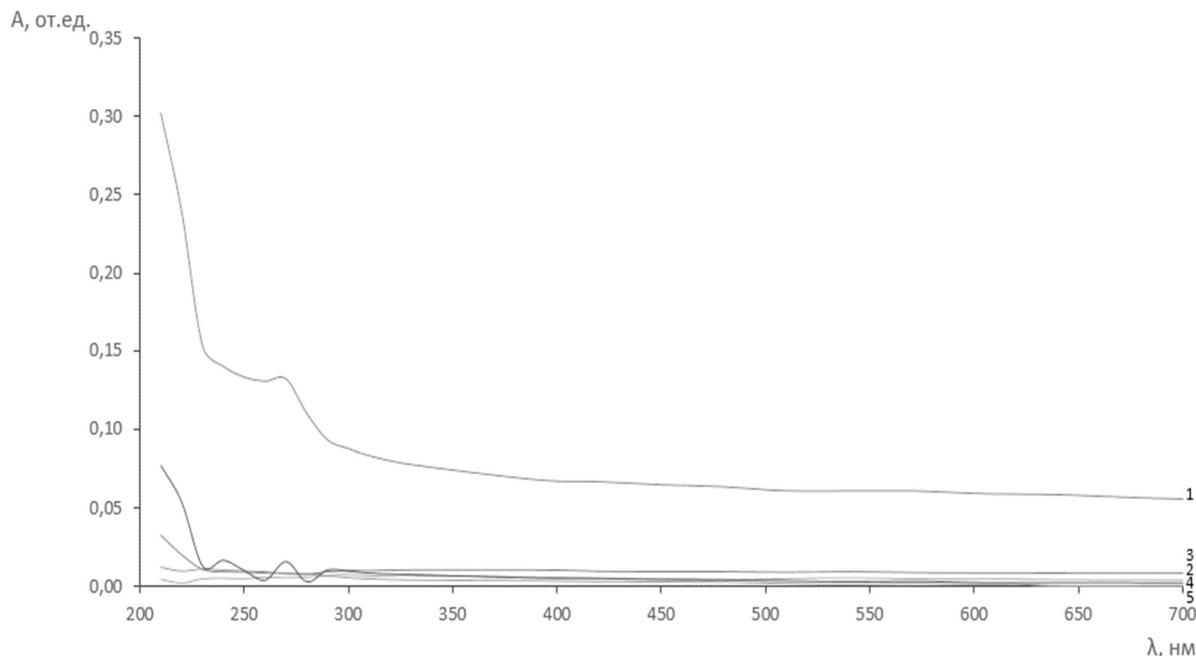
**Таблица 2 – Концентрации растворов тестовой выборки**

Природа аналита	Концентрация маточного раствора, г/л	Концентрация рабочих растворов, мг/л
Нефтепродукты	1,0	2,00; 1,00; 1,92
Жиры	10,0	20,00; 2,00; 76,00
ПАВ	10,0	20,00; 80,00; 30,00
Фенол	0,2	4,00; 0,80; 1,20

Спектры анализируемых тестовых систем регистрировали при тех же условиях, что и спектры в обучающей выборке. Пример спектра тестовой выборки приведен на рисунке 2.

После каждого тестирования нейросеть обучалась на примерах, которые участвовали в предыдущих тестах. Это расширяло определяющую способность нейросети на случайных показателях концентраций. В качестве примера в таблице 3 приведены результаты работы нейросети на тестовой системе.

По результатам анализа обучающего множества нейросети рассчитаны показатели относительного стандартного отклонения для каждого аналита системы (таблица 4).



**Рисунок 2 – УФ-спектры растворов обучающей выборки, состоящих из:** 1 – нефтепродуктов (1 мг/л), жиров (2 мг/л), ПАВ (80 мг/л), фенола (0,8 мг/л); 2 – нефтепродуктов (1 мг/л); 3 – жиров (2 г/л); 4 – ПАВ (8 г/л); 5 – фенола (0,8 г/л)

Таблица 3 – Пример результатов тестирования нейросети

Состав раствора	Введено (с, мг/л)	Найдено (с, мг/л)
Нефтепродукты	1,200	7,600 ± 0,015
Жиры	76,000	72,100 ± 0,158
ПАВ	30,000	57,800 ± 0,171
Фенол	1,900	1,000 ± 0,006

Таблица 4 – Показатели среднего стандартного отклонения

Определяемый компонент	S <sub>r</sub>
Нефтепродукты	0,12
Жиры	0,14
ПАВ	0,12
Фенол	0,07

**Выводы.** Таким образом, проанализированы индивидуальные спектры поглощения модельных органических токсикантов (нефть и нефтепродукты, поверхностно-активные вещества, жиры, фенол). Из-за перекрывания спектров поглощения в многокомпонентных системах невозможно провести определение анализаторов традиционным способом – по показаниям спектрофотометрического анализа. Для решения поставленной проблемы в работе предложено использовать искусственные нейронные сети. Для этого создана нейронная сеть на базе нейромедиатора NeuroPro 0.25, а также обучающая выборка, состоящая из 150

многокомпонентных модельных растворов с различной концентрацией анализаторов, включающая 3600 реперных точек. На основе базы данных проведено обучение созданной нейросети, определена значимость входных параметров. Показана возможность анализа аналитического сигнала с помощью нейронных сетей при определении токсикантов, изучаемых в работе, при их одновременном присутствии. Рассчитаны относительные стандартные отклонения для нефтепродуктов, жиров, ПАВ и фенола на основе всего обучающего множества данных, которые, соответственно, составили 0,12; 0,14; 0,12; 0,07.

Полученные данные представляют интерес при автоматизации работы роботизированных систем, связанных с необходимостью принятия решений в зависимости от химического состава окружающей среды, содержащей органические токсиканты.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Timofeev A.V. Intelligent Control Applied to Non-Linear Systems and Neural Networks with Adaptive Architecture. Journal of Intelligent Control, Neurocomputing and Fuzzy Logic. 1996. V.1. № 1. P.1-18.
2. Тимофеев А.В. Мультиагентные системы и нейросетевые технологии в робототехнике и информатике. Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2011. №1-1. С. 249-252.
3. Green N., Naik S., Campbell J. Neural Networks in Robotics: Application of a Recurrent Neural Network to Robot State Estimation // Computer Science, Engineering. 2019.
4. Оскотская Э.Р., Грибанов Е.Н., Басаргин Н.Н. Прогнозирование физико-химических свойств полимерных сорбентов с использованием искусственных нейронных сетей //Материалы докладов съезда аналитиков России «Аналитическая химия – новые методы и возможности». Москва-Клязьма. 2010. С.212-213.
5. Boiko D. A., Kozlov K. S., Burykina J. V., Ilyushenkova V. V., Ananikov V. P., J. Am. Chem. Soc. 2022. V. 144. 14590.
6. Durmaz A. R., Müller M., Lei B. and etc. Nat. Commun. 2021. V. 12. 6272.
7. Mehdi Jalali-Heravi. Neural Networks in Analytical Chemistry. Artificial Neural Networks. 2009. V. 458.
8. Викулина Д.А., Анализ воздействия отработанных жиров предприятий питания на окружающую среду // Материалы VIII Всероссийской научной студенческой конференции с элементами научной школы имени профессора М.К. Коровина. Томск: Изд-во ТПУ. 2015. С. 41- 42.
9. Мансураева Л.М., Юсупова И.И., Булаев С.А. Поверхностно-активные вещества: свойства и применение // Вестник магистратуры: химические технологии. 2022. № 2-1. С. 30-35
10. Тыжигирова В.В. Анализ органических соединений из класса фенолов: учебное пособие // ФГБОУ ВО ИГМУ Минздрава России, кафедра фармацевтической и токсикологической химии. – Иркутск: ИГМУ, 2017. 33 с.
11. Блинновская Я.Ю., Гаврило М.В., Дмитриев Н.В. Методические подходы к созданию карт экологически уязвимых зон и районов приоритетной защиты акваторий и берегов Российской Федерации от разливов нефти и нефтепродуктов – М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF). 2012. 62 с.
12. Уайт-спирит (Нефрас С4-155/200) // Инфрахим [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.infrahim.ru/products/2277>
14. Калорийность Подсолнечное масло. Химический состав и пищевая ценность. // МЗР [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://health-diet.ru/base\\_of\\_food/sostav/283.php](https://health-diet.ru/base_of_food/sostav/283.php)
15. Фенолы// ЗФТШ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://zftsh.online/articles/4976>
16. ГН 2.1.5.1315-03 Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурнобытового водопользования. Издание официальное. – М.: Минздрав РФ, 2004. 152 с.
17. Нейромедиатор NEUROPRO 0.25 // STUDYLIB [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studylib.ru/doc/422181/nejroimitator-neuropgo-0.25>
18. Аравин О.И., Новиков А.Ю., Селифонова Е.И., Чернова Р.К., Шевырев С.П. // Извести Саратовского университета. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2011. Т. 11. № 1. С. 105-111.
19. Горожанина Е.И. Нейронные сети: учебное пособие / Е.И. Горожанина. – Самара: ФГБОУ ВО ПГУТИ. 2017. С. 84.
20. LeCun, Yann; Bengio, Yoshua; Hinton, Geoffrey. Deep learning // Nature. 2015.V.521. P. 436-444.
21. Сергеев Я.Д., Квасов Д.Е. Краткое введение в теорию липшицевой глобальной оптимизации: учебно-методическое пособие. Нижний Новгород: Издательство ННГУ. 2016. 40 с.

**Грибанов Евгений Николаевич**

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева  
302026, Россия, г. Орёл, ул. Комсомольская, 95  
к.х.н., доцент, зав. кафедрой химии  
E-mail: gribanoven@gmail.com

**Юшкова Элеонора Юрьевна**

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева  
302026, Россия, г. Орёл, ул. Комсомольская, 95  
к.х.н., доцент  
E-mail: savally2@gmail.com

**Родичев Алексей Юрьевич**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел  
кандидат технических наук, доцент кафедры  
мехатроники, механики и робототехники  
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 29  
E-mail: rodfox@yandex.ru

**Ананько Александр Станиславович**

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева  
студент  
302026, Россия, г. Орёл, ул. Комсомольская, 95  
E-mail: twerp@inbox.ru

**Родичева Ирина Владимировна**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел  
аспирант кафедры мехатроники, механики и  
робототехники  
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 29  
E-mail: irina.rodicheva.rodicheva@yandex.ru

---

GRIBANOV E.N., YUSHKOVA E.YU., RODICHEV A.YU., ANANKO A.S., RODICHEVA I.V.

## **AUTOMATION OF CHEMICAL CONTROL OF WATERS CONTAINING ORGANIC TOXICANTS FOR ROBOTIC SYSTEMS**

**Abstract:** The paper shows the possibility of using artificial neural networks to determine the concentration of organic toxicants (oil and petroleum products, surfactants, fats, phenol) in model water systems. For this purpose, a database of spectra of 150 multicomponent model aqueous solutions with different concentrations of detectable substances has been created, including 3600 reference points. Based on this database, the neural network was trained, the significance of each input parameter was determined. The possibility of analyzing the analytical signal using a neural network in determining the toxicants studied in the work, with their simultaneous presence, is shown. The relative standard deviation for petroleum products, fats, surfactants and phenol was calculated based on the entire training set of the neural network, which was, respectively, 0,12; 0,14; 0,12; 0,07. The data obtained are of interest in automating the operation of robotic systems when it is necessary to make decisions depending on the chemical composition of the environment containing organic toxicants.

**Keywords:** neural network, chemical analysis, automation, robotic systems.

**Gribanov Evgeny Nikolaevich**

Oryol State University  
Candidate of Chemical Sciences, associate professor,  
head of the department of Chemistry  
302026, Russia, Oryol, st. Komsomolskaya, 95  
E-mail: gribanoven@gmail.com

**Yushkova Eleonora Yurievna**

Oryol State University  
Candidate of Chemical Sciences, associate professor  
302026, Russia, Oryol, st. Komsomolskaya, 95  
E-mail: savally2@gmail.com

**Rodichev Alexey Yuryevich**

Orel State University,  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of  
the Department Mechatronics, Mechanics and Robotics  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail rodfox@yandex.ru

**Ananko Aleksandr Stanislavovich**

Oryol State University  
student  
Address: 302026, Russia, Oryol, st. Komsomolskaya, 95  
E-mail: twerp@inbox.ru

**Rodicheva Irina Vladimirovna**

Orel State University,  
Postgraduate student of the Department Mechatronics,  
Mechanics and Robotics  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail irina.rodicheva.rodicheva@yandex.ru

КОРОБКО А.В., КАЛАШНИКОВА Н.Г.

## НОВЫЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ В ДВУМЕРНЫХ ЗАДАЧАХ МЕХАНИКИ

**Аннотация.** В статье приводятся сведения о фундаментальных закономерностях в механике, рассматривающие основные интегральные характеристики технической теории пластинок, такие, как максимальный прогиб, основная частота колебаний пластинок и мембран, критическая сила при потере устойчивости, разрушающая нагрузка в предельном состоянии, геометрическая жесткость сечений в задачах кручения упругих призматических стержней, в их взаимосвязи с геометрическим параметром формы области (коэффициентом формы), которые позволяют взглянуть на проблему моделирования строительных и машиностроительных конструкций во взаимосвязи их интегральных физических и геометрических характеристик.

**Ключевые слова:** максимальный прогиб, основная частота колебаний, критическая сила, геометрическая жесткость сечений, интегральные физические характеристики, коэффициент формы, жесткость пластинок, геометрическая аналогия, выпуклый контур.

### Введение

В теории упругости существует класс задач, которые описываются дифференциальными уравнениями эллиптического типа второго и четвёртого порядка. К этому классу относятся задачи о поперечном изгибе и свободных колебаниях пластин и мембран, об устойчивости пластин, о кручении упругих призматических стержней, а также вопросы предельного равновесия пластин.

Для этих задач можно определить следующие интегральные физические характеристики: максимальный прогиб  $w_0$ , основная частота колебаний  $\omega$ , критическая сила при потере устойчивости пластин  $N_0$ , приведённая геометрическая жёсткость сечения  $i_k$  при кручении бруса, разрушающая нагрузка  $P_{\text{разр}}$  в предельном состоянии пластин.

Эти характеристики зависят от геометрических размеров, физических свойств материала конструкций и граничных условий.

Если сравнить конструкции, выполненные из одного и того же материала и работающие в одинаковых условиях, но имеющие разную форму, то можно увидеть, что интегральные физические характеристики будут зависеть только от формы.

### 1 Геометрический аналог интегральных физических характеристик в двумерных задачах МДТТ

В источнике [1] приведена интегральная геометрическая характеристика плоской области с выпуклым контуром (позднее названная коэффициентом формы), которая является количественной мерой формы области и определяется в виде контурного интеграла

$$K_{fa} = \oint ds/h, \quad (1)$$

где  $ds$  – элемент касательной проведенной к контуру области;

$h$  – перпендикуляр, опущенный из полюса « $a$ », взятого внутри области, на касательную (рисунок 1, а).

В каждой области с выпуклым контуром имеется единственная точка, обеспечивающая минимум коэффициенту формы  $K_f = \min K_{fa}$  [1].

Для областей с полигональным контуром (рисунок 2) из (1) получим:

$$K_f = \sum_{i=1}^n \frac{\ell_i}{h_i} = \sum_{i=1}^n (\operatorname{ctg} \alpha_i + \operatorname{ctg} \beta_i) = \sum_{i=1}^n (\operatorname{ctg} \alpha_i + \operatorname{ctg} \beta_{i-1}), \quad (2)$$

где  $n$  – число сторон многоугольника, а остальные обозначения приведены на рисунке 1, б.

Для областей с криволинейным контуром  $r = r(\varphi)$ , подставляя в формулу (1) известные из дифференциальной геометрии зависимости  $ds = \sqrt{r^2 + r'^2} d\varphi$  и  $r/h = ds/(rd\varphi)$ , получим:

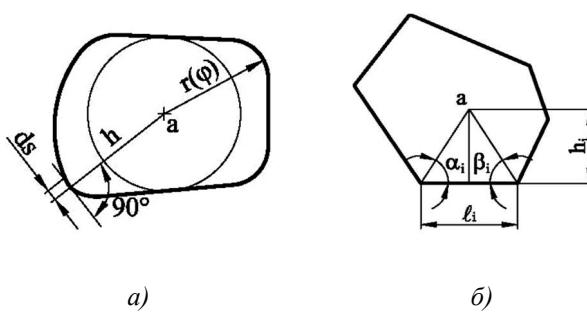
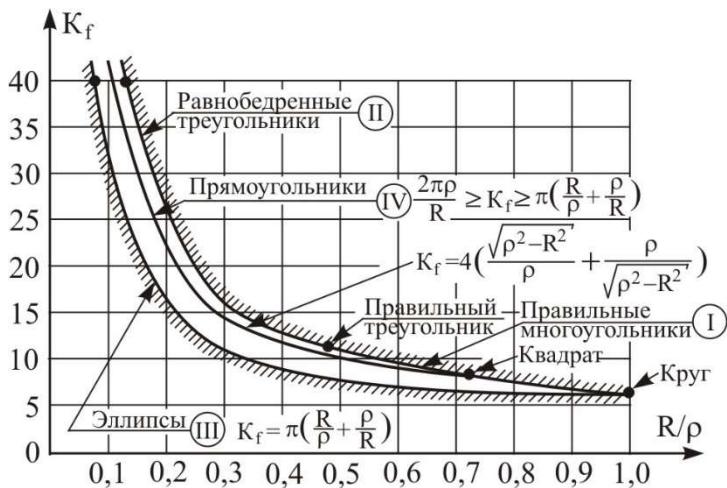


Рисунок 1 – определение коэффициента формы:  
а) произвольной выпуклой области,  
б) полигональной области

$$K_f = \oint_L \frac{ds}{h} = \int_0^{2\pi} \frac{d^2 s}{r^2 d} = \int_0^{2\pi} \left( 1 + \frac{r'^2}{r^2} \right) d\phi. \quad (3)$$



**Рисунок 2 – Двухсторонняя ограниченность значений  $K_f$**   
которую можно представить соответственно в виде двусторонних неравенств (4)

$$\begin{aligned} \frac{2\pi\rho}{R} &\geq K_f \geq \pi \left( \frac{R}{\rho} + \frac{\rho}{R} \right), \\ \frac{2\pi\rho}{R} &\geq K_f \geq 4 \left( \frac{\sqrt{\rho^2 - R^2}}{\rho} + \frac{\rho}{\sqrt{\rho^2 - R^2}} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

В работах [2, 3] были проведены детальные исследования изопериметрических свойств и закономерностей изменения коэффициента формы различных плоских фигур, таких как треугольники, прямоугольники, параллелограммы и трапеции, при разнообразных геометрических преобразованиях.

## 2 Анализ взаимосвязи между комплексными физическими характеристиками и формой в контексте определённых проблем механики деформируемых твёрдых тел

При анализе ряда известных точных решений, задач технической теории пластиинок и чистого кручения призматических брусьев удалось в явном виде выделить коэффициент формы [4]. Часть этих результатов в окончательном виде с использованием общепринятых в строительной механике обозначений приводится ниже.

Определение предельной деформации эллиптической пластины, жёстко защемлённой по контуру и подвергающейся воздействию равномерно распределённой нагрузки –

$$w_0 = \frac{q}{8D} \frac{A^2}{(K_f)_s} \frac{1}{3 - (K_f)_{kp}^2 / (K_f)_s^2}, \quad (5)$$

где  $(K_f)_s = \pi(a/b + b/a)$  – коэффициент формы эллипса,  $a$  и  $b$  – полуоси эллипса.

Максимальный прогиб прямоугольной шарнирно опёртой по контуру пластиинки, нагруженной синусоидальной нагрузкой  $q = q_0 \sin \pi x / a \sin \pi y / b$  –

$$w_0 = \frac{16q_0}{\pi^4 D} \frac{A^2}{(K_f)_{np}}, \quad (6)$$

где  $(K_f)_{np} = 4(a/b + b/a)$  – коэффициент формы прямоугольника;

$a$  и  $b$  – длины сторон прямоугольника.

Основная частота колебаний шарнирно опёртой прямоугольной пластиинки –

$$\omega = \frac{\pi^2}{4} \frac{(K_f)_{np}}{A} \sqrt{\frac{D}{m}}. \quad (7)$$

Критическое усилие прямоугольной шарнирно опёртой пластиинки, равномерно сжатой

Коэффициент формы обладает изопериметрическими свойствами, например: из всех областей с выпуклым контуром круг имеет наименьшее значение  $(K_f)_{kp} = 2\pi$ ; из всех четырёхугольников квадрат имеет наименьшее значение  $K_f = 8$  и т.п.

Если все множество значений  $K_f$  для областей с выпуклым контуром представить в координатных осях  $K_f - R/\rho$  ( $R$  – максимальный радиус окружности, вписанной в область,  $\rho$  – минимальный радиус окружности, описанной вокруг неё) (рисунок 2), то будет справедлива закономерность,

по контуру –

$$N_0 = \frac{\pi^2}{4} \frac{(K_f)_{np}}{A} D. \quad (8)$$

Чистое кручение бруса с эллиптическим сечением –

$$I_k = A^2 / (K_f). \quad (9)$$

В этих случаях интегральные физические показатели, такие как площадь пластинки или сечения  $A$ , а также цилиндрическая жёсткость  $D$  пластинок, интенсивность равномерно распределённой нагрузки  $q$  и масса единицы площади  $m$ , зависят только от коэффициента формы. Строгое теоретическое доказательство этого замечательного свойства коэффициента формы для областей различных форм приведено в работе [2]. Таким образом,

$$w_0 = K_w \frac{qA^2}{K_f^2}, \quad \omega = K_\omega \sqrt{\frac{D}{m}} \frac{K_f}{A}, \quad N_0 = K_N \frac{K_f}{A} D, \quad I_k = K_I \frac{A^2}{K_f}, \quad P_{разр} = K_P K_f, \quad (10)$$

где  $K_w, K_\omega, K_N, K_I, K_P$  – коэффициенты пропорциональности в соответствующих задачах строительной механики, зависящие от формы пластинок (сечения) и вида граничных условий.

Графические иллюстрации указанного свойства для задачи свободных колебаний пластинок представлены на рисунках 3 и 4.

На рисунке 3 показан график изменения величины  $1/K_f$  равнобедренных треугольников в зависимости от угла при основании. Как видно из этого рисунка, все множество значений коэффициента формы для треугольников ограничено кривыми 0-1-2-3, причем кривые 0-1 и 1-3 ограничивают значения  $K_f$  для тупоугольных треугольников, а кривые 1-2-3 и 1-3 – для остроугольных.

На рисунке 4 изображён график изменения величины  $1/\omega$  в виде равнобедренного треугольника: для шарнирно опертых пластинок схема *a*, для жестко защемленных пластинок схема *b*. Эти графики построены с использованием известных решений, приводимых в справочной литературе.

Все обозначения на рисунке 4 соответствуют обозначениям рисунка 3. Такого же вида кривые получаются и в случае построения зависимостей  $w_0 - \alpha$ ,  $N_0 - \alpha$ ,  $I_k - \alpha$  [2].

Аналогично можно показать подобие рассмотренных зависимостей, для параллелограммных, трапециевидных пластинок и пластинок других характерных форм (см., например [2]).

Таким образом, можно сформулировать первую фундаментальную закономерность: Коэффициент формы плоской области с выпуклым контуром представляет собой геометрический аналог интегральных физических характеристик в рассматриваемых двумерных задачах строительной механики, где применяются однородные граничные условия, такие как шарнирное опирание или жёсткое защемление по контуру пластинок и мембран. По свойствам и поведению этого коэффициента при геометрических преобразованиях формы областей можно судить как о качественной, так и о количественной стороне задачи.

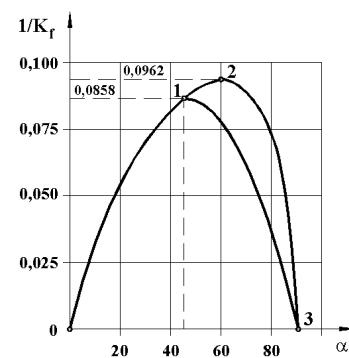


Рисунок 3 – График изменения величины  $1/K_f$  равнобедренных треугольников

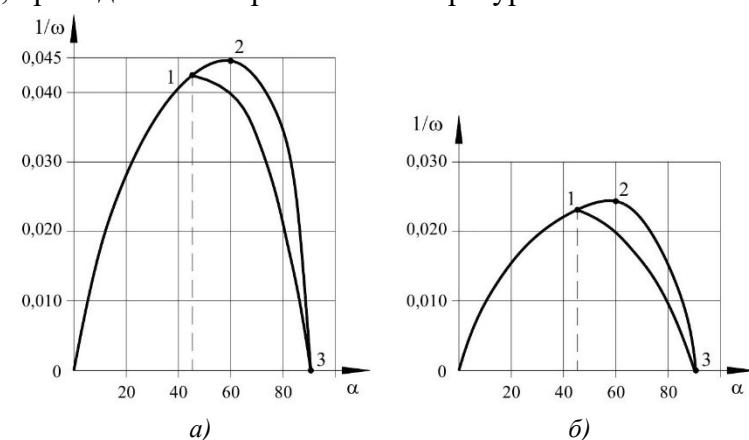
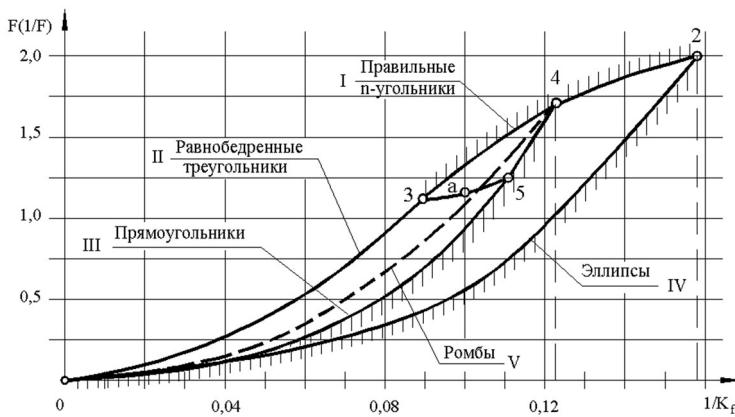


Рисунок 4 – График изменения величины  $1/\omega$



**Рисунок 5 – Двухсторонняя ограниченность интегральных характеристик**

сторон: одну из границ, нижнюю или верхнюю, образуют эллиптические области; другую границу, верхнюю или нижнюю, образуют области в виде правильных фигур и равносторонних треугольников.

Для областей в виде произвольного четырёхугольника и треугольника одну из границ, нижнюю или верхнюю, образуют прямоугольники. Эта закономерность в обобщённом виде приведена на рисунке 5.

Таким образом, если для какой-либо задачи построить указные на рисунке 5 граничные кривые, то с их помощью можно, не решая задачи, производить двусторонние оценки интегральных физических характеристик для пластинок любых форм. Можно также определять эти физические характеристики с более высокой точностью, используя метод интерполяции по коэффициенту формы [2].

### 3 Взаимосвязь задач поперечного изгиба и свободных колебаний пластинок

Специалистам в области МДТТ хорошо известно, что жёсткость пластинок (максимальный прогиб) функционально связана с основной частотой их колебаний.

Рассмотрим произведение  $w_0\omega^2$ , воспользовавшись формулами (10):

$$w_0\omega^2 = K_w K_\omega^2 \frac{q}{m} = K \frac{q}{m}, \quad (11)$$

где  $K = K_w K_\omega^2$ .

Коэффициент пропорциональности  $K$ , как и коэффициенты  $K_w$  и  $K_\omega$  его образующие, зависит от формы области. Доказать высказанное предположение аналитически пока не удалось, а подтвердить его на основе численного эксперимента можно.

Известно, что расчёт бесконечно вытянутых пластинок сводится к расчёту обычной балки с аналогичными граничными условиями на её концах. При этом изгибная жёсткость балки  $EI$  заменяется на цилиндрическую жёсткость пластинки  $D$ . Логично предположить, что для всего многообразия форм пластинок граничными решениями для произведения  $w_0\omega^2$  будут решения, соответствующие круглым пластинкам и балкам.

Основная частота собственных колебаний и максимальный прогиб однопролётных балок, нагруженных равномерно распределённой нагрузкой, могут быть определены по формулам.

$$\omega = \beta^2 \sqrt{EI/(m\ell^4)}, \quad w_0 = \alpha q\ell^4/EI,$$

где  $\ell$  – пролёт балок;

$\beta^2$  – собственное значение дифференциального уравнения колебаний;

$\alpha$  – собственное значение дифференциального уравнения изгиба балок, которые зависят от условий закрепления её концов.

Умножим максимальный прогиб пластинки на квадрат основной частоты колебаний:

$$w_0\omega^2 = \alpha \beta^4 \frac{q}{m}.$$

Это означает, что физическая проблема, связанная с решением дифференциальных уравнений, может быть сведена к чисто геометрической задаче.

Вторая закономерность вытекает из первой на основании свойства о двусторонней ограниченности коэффициента формы (4) и зависимостей (10). Всё множество интегральных физических характеристик  $F$  в двумерных задачах строительной механики, представленное в координатных осях  $F - K_f$ , ограничено с двух

Как видно из этого равенства, произведение  $w_0\omega^2$  не зависит от жесткости балки. Но самое важное свойство этого произведения заключается в том, что коэффициент пропорциональности в нем  $K = \alpha\beta^4$  – величина постоянная для любых граничных условий балки (исключая условия свободного края) и с погрешностью, не превышающей 0,96 %, равна величине  $4/\pi$ :

$$w_0\omega^2 = \alpha\beta^4 \frac{q}{m} = \frac{4}{\pi} \frac{q}{m}. \quad (12)$$

Сопоставление этого произведения для балок с различными граничными условиями приведено в статье [5].

Рассмотрим произведение  $w_0\omega^2$  для круглых пластинок, позаимствовав необходимые результаты из работ [6, 7]: для жестко защемленных пластинок

$$w_0 = 0,01563 \frac{qR^4}{D}, \quad \omega^2 = 3,196^4 \frac{D}{mR^4},$$

$$w_0\omega^2 = 0,01563 \times 3,196^4 \frac{q}{m} = 1,639 \frac{q}{m};$$

для шарнирно опертых пластинок

$$w_0 = \frac{5+\gamma}{1+\gamma} \frac{qR^4}{64D} = 0,0637 \frac{qR^4}{D}, \quad \omega^2 = 2,23I^4 \frac{D}{mR^4},$$

$$w_0\omega^2 = 0,0637 \times 2,23I^4 \frac{q}{m} = 1,578 \frac{q}{m}.$$

Как видно, оба результата незначительно отличаются друг от друга (разница от среднего 1,90 %), а от значения  $(4/\pi)^2$  первый результат отличается на 1,10 %, а второй – на 2,66 %. На основании проведённого сопоставления можно сделать вывод, что верхняя граница произведения  $w_0\omega^2$  для пластинок произвольной формы с любыми граничными условиями, включая произвольные комбинации шарнирного опирания и жёсткого защемления по контуру, с точностью до размерного множителя  $q/m$  равна  $(4/\pi)^2$ . Тогда для пластинок произвольной формы и произвольными граничными условиями:

$$\frac{4}{\pi} \frac{q}{m} \leq w_0\omega^2 \leq \left(\frac{4}{\pi}\right)^2 \frac{q}{m}. \quad (13)$$

Численное подтверждение этой закономерности на примере пластинок с однородными и комбинированными (различные комбинации шарнирного опирания и жёсткого защемления по сторонам прямоугольных пластинок) граничными условиями приводится в работе [4], где показано,

$$K = \alpha\beta^4 = const. \quad (14)$$

График  $K - 1/K_f$  представляется в виде линии (рисунок 6), ординаты конечных точек которой равны  $4/\pi$  и  $(4/\pi)^2$ . На этом рисунке точка  $O$  соответствует пластинке в виде круга, точка 4 – квадратной пластинке, точка 3 – пластинке в виде правильного треугольника. В координатных осях  $K - K_f$  эта кривая будет асимптотической с асимптотой, равной  $4/\pi$ .

Таким образом, можно сформулировать третью фундаментальную закономерность в теории пластин: для всего множества упругих изотропных пластин с выпуклым контуром, постоянной толщиной и произвольной формой, независимо от вида граничных условий, произведение максимального статического прогиба от действия равномерно распределённой нагрузки на квадрат основной частоты их колебаний в ненагруженном состоянии, представленное в координатных осях  $w_0\omega^2 - K_f$ , вырождается в асимптотическую кривую. На основе, этой закономерности неравенства (13) заменим выражением

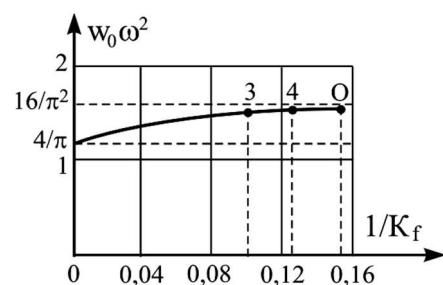


Рисунок 6 – Асимптотическая кривая зависимости  $w_0\omega^2$  от  $K_f$

$$w_0\omega^2 = f(K_f)q/m, \quad (15)$$

тогда данная зависимость строится, по известным решениям соответствующих задач, приводимых в научной и справочной литературе. Нами такая зависимость построена:

$$w_0\omega^2 = \left( \frac{4}{\pi} + \frac{10,502}{K_f} - \frac{34,511}{K_f^{1,5}} + \frac{33,420}{K_f^2} \right) \times \frac{q}{m}. \quad (16)$$

Эта кривая соответствует известным решениям, представленным в научной и справочной литературе, с погрешностью, не превышающей четырёх процентов.

Используя формулу (16), можно, опираясь на известные значения максимального прогиба в задачах поперечного изгиба пластинок, определить их основные частоты колебаний (см. рисунок 7). И наоборот, опираясь на известные основные частоты колебаний пластинок, можно вычислить значения максимального прогиба.

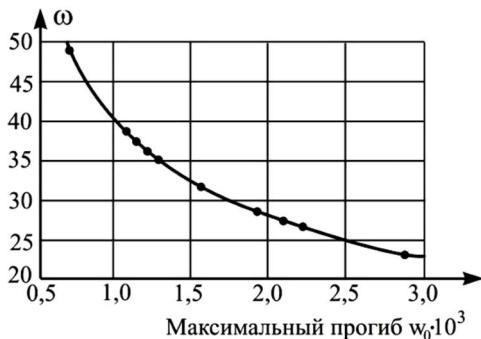


Рисунок 7 – График зависимости  $w_0 - \omega$

Путем анализа результатов известных решений для пластинок с любыми граничными условиями можно построить аппроксимирующую функцию  $w_0 - k$ :

$$w_0 = \left( 1,877 \times 10^{-3} - 4,006 \times 10^{-5} k^2 + 2,312 \times 10^{-7} k^4 - 0,296 k^{-3} + 2,429 k^{-4} \right) \frac{qA^2}{D}, \quad (17)$$

где  $k$  – частотный параметр, стоящий перед размерным множителем  $\sqrt{D/m}/A$  в формуле для основной частоты колебаний.

### Заключение

В статье представлены три новые закономерности, обнаруженные в рамках двумерных задач механики деформированного твердого тела, которые имеют фундаментальное значение. Эти закономерности позволяют по-новому взглянуть на проблему геометрического и физико-механического моделирования строительных и машиностроительных конструкций в контексте их физических характеристик.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полиа, Г. Изопериметрические неравенства в математической физике [Текст] / Г. Полиа, Г. Сёге. – М.: КомКнига, 2006. – 336 с.
2. Коробко, А.В. Геометрическое моделирование формы области в двумерных задачах теории упругости [Текст] / А.В. Коробко. – М.: Изд-во АСВ, 1999. – 302 с.
3. Коробко, В.И. Количественная оценка симметрии [Текст] / В.И. Коробко, А.В. Коробко. – М.: Изд-во АСВ, 2008. – 126 с.
4. Коробко, В.И. Изопериметрический метод в строительной механике: Теоретические основы изопериметрического метода [Текст] / В.И. Коробко. – М.: Изд-во АСВ, 1997. – 390 с.
5. Коробко, В.И. Некоторые закономерности колебаний однопролетных балок [Текст] / В.И. Коробко // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1988. – №3. – С. 41-44.
6. Тимошенко, С.П. Пластиинки и оболочки [Текст] / С.П. Тимошенко, С Войновский-Кригер. М.: Главная редакция физико-математической литературы, 1966. – 636 с.
7. Гонткевич, В.С. Собственные колебания пластинок и оболочек: Справочное пособие [Текст] / В.С. Гонткевич. – Киев: Наукова думка, 1964. – 288 с.
8. Коробко В.И., Савин С.Ю. Свободные колебания треугольных ортотропных пластинок с однородными и комбинированными граничными условиями. // Строительство и реконструкция. – 2013. – № 2. – С. 33-40.
9. Коробко В.И., Савин С.Ю., Бояркина С.В. Изгиб треугольных ортотропных пластинок с однородными и комбинированными граничными условиями. // Строительство и реконструкция. – Орел: ГУ-УНПК. – 2012. – №1. – С. 7-13.
10. Гефель В.В., Коробко А.В. Взаимосвязь поперечного изгиба и свободных колебаний треугольных пластинок. // Известия ОрелГТУ. Серия Строительство. – № 1-2. – 2006. – С. 24-27.

**Коробко Андрей Викторович**

ФГБОУ «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орел  
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры мехатроники, механики и робототехники  
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95.  
Тел.: +7 (4862)43-58-94  
E-mail: ankor.66@mail.ru

**Калашникова Наталия Григорьевна**

ФГБОУ «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орел  
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры  
мехатроники, механики и робототехники  
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95.  
Тел.: +7 (4862)45-50-31  
E-mail: naka.61@mail.ru

KOROBKO A.V., KALASHNIKOVA N.G.

**NEW FUNDAMENTAL PATTERNS IN TWO-DIMENSIONAL PROBLEMS OF MECHANICS**

**Abstract.** The article provides information on fundamental laws in the mechanics considering the main integral characteristics of the technical theory of plates such as maximum deflection, the main frequency of vibrations of plates and membranes, critical force at loss of stability, destructive load in the limiting state, geometric stiffness of sections in torsion problems of elastic prismatic rods, in their relationship with the geometric parameter of the shape of the area (shape coefficient), which allow us to look at the problem of modeling construction and machine-building structures in the relationship of their integral physical and geometric characteristics.

**Keywords:** maximum deflection, fundamental oscillation frequency, critical force, geometric stiffness of sections, integral physical characteristics, shape coefficient, stiffness of plates, geometric analogy, convex contour.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Polia, G. Isoperimetric inequalities in mathematical physics [Text] / R. Polia, G. Sege. Moscow: KomKniga Publ., 2006, 336 p.
2. Korobko, A. B. Geometric modeling of the shape of a domain in two-dimensional problems of elasticity theory. Korobko. Moscow: Publishing House of the Russian Academy of Sciences, 1999, 302 pp.
3. Korobko, In. And. Quantification of symmetry [Text] / In. And. Korobko, A. B. Korobko. Moscow: Publishing House of the Russian Academy of Sciences, 2008.
4. Korobko, In. And. Isoperimetric method in construction mechanics: Theoretical foundations of the isoperimetric method. Korobko. Moscow: Publishing House of the Russian Academy of Sciences, 1997. –390 s.
5. Korobko, In. And. Some regularities of vibrations of single-span beams [Text] / In. And. Korobko / Izv. universities. Construction and architecture. – 1988. – №3. – From. 41-44.
6. Tymoshenko, S. P. Plates and shells [Text] / S. P. Timoshenko, S. Voynovsky-Krieger, Moscow: Main Editorial Office of Physical and Mathematical Literature, 1966, 636 p.
7. Gontkevich, V. S. Natural vibrations of plates and shells: A reference manual. Gontkevich. Kiev: Naukova dumka Publ., 1964, 288 p.
8. Korobko In. I., Savin With. Yu. Free vibrations of triangular orthotropic plates with homogeneous and combined boundary conditions. // Construction and reconstruction. – 2013. – № 2. - With. 33-40.
9. Korobko V. I., Savin S. Y., Boyarkina S. V. Bending of triangular orthotropic plates with homogeneous and combined boundary conditions. // Construction and reconstruction. - Orel: GU-UNPC. – 2012. - No. 1. - With. 7-13.
10. Gefel In. In., Korobko A. B. The relationship between transverse bending and free vibrations of triangular plates. // Izvestiya OrelSTU. Series Construction. – № 1-2. – 2006. - From. 24-27.

**Korobko Andrey Victorovich**

Orel State University, Orel  
Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Mechatronics, Mechanics and Robotics 302026, Orel, Komsomolskaya st, 95  
Ph.: +7 (4862)43-58-94  
E-mail: ankor.66@mail.ru

**Kalashnikova Nataley Grigoryevna**

Orel State University, Orel  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mechatronics, Mechanics and Robotics 302026, Orel, Komsomolskaya st, 95  
Ph.: +7 (4862)45-50-31  
E-mail: naka.61@mail.ru

# **ПРИБОРЫ, БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ**

УДК 53.082.5+ 616.36-008.5+616-079

DOI: 10.33979/2073-7408-2024-368-6-108-117

КАНДУРОВА К.Ю., МАМОШИН А.В., ПОТАПОВА Е.В.

## **МЕТОД И УСТРОЙСТВО МУЛЬТИМОДАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ПЕЧЕНИ НА ОСНОВЕ ФЛУОРЕСЦЕНТНО-ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ**

**Аннотация.** В статье рассматривается метод диагностики функционального состояния печени пациентов с синдромом механической желтухи, базирующийся на применении мультимодального устройства флуоресцентной спектроскопии и спектроскопии диффузного отражения. Проведена апробация разработанного метода в клинических условиях во время антеградной декомпрессии желчных протоков под ультразвуковым и рентгенологическим контролем. По результатам исследований разработана модель классификации на основе линейного дискриминантного анализа, которая позволяет прогнозировать наличие отрицательной динамики состояния пациента в послеоперационном периоде билиарной декомпрессии с показателями чувствительности и специфичности не менее 0,85 и 0,89 соответственно.

**Ключевые слова:** печень, механическая желтуха, печеночная недостаточность, флуоресцентная спектроскопия, спектроскопия диффузного отражения.

### **Введение**

В настоящее время в абдоминальной хирургии сохраняют свою актуальность вопросы лечения пациентов с патологией, осложненной синдромом механической желтухи (МЖ). Данное состояние сопровождает доброкачественные (желчнокаменная болезнь, стриктуры, кисты и др.) и злокачественные заболевания гепатопанкреатодуodenальной зоны, число которых ежегодно возрастает [1,2].

Распространенным является двухэтапный подход лечения, предполагающий в качестве первого этапа как можно более раннюю декомпрессию желчных протоков с помощью чрескожных минимально инвазивных вмешательств для купирования МЖ и предупреждения осложнений перед последующим лечением первичной патологии [3]. Данная тактика продиктована тем, что при длительной билиарной гипертензии повреждение гепатоцитов и холангiocитов приводит к частичному или полному нарушению функций печени – печеночной недостаточности (ПН), прогрессирующей со временем и способной привести к летальному исходу [4,5]. Однако, в ряде случаев отмечается, что установка дренирующих систем и снижение билиарной гипертензии не только не приводит к стабилизации и улучшению, но и может ухудшить состояние пациента [6–9], что может быть обусловлено тяжелым нарушением функционального состояния печени на момент проведения оперативного вмешательства [10,11].

В текущей клинической практике для того, чтобы врач имел представление о степени МЖ, её осложнений и о состоянии паренхимы печени, применяется широкий ряд лабораторных (биохимические анализы – содержание в крови фракций билирубина, печеночных ферментов и др.) и инструментальных методов диагностики (ультразвуковое исследование, мультиспиральная компьютерная томография, магнитно-резонансная томография), а также комплексные оценки в виде прогностических шкал. Несмотря на высокий уровень и большое количество упомянутых видов диагностики, прогнозирование течения послеоперационного периода билиарной декомпрессии, остается сложной задачей. Применяемые инструменты оценки печеночной недостаточности не являются специфичными для синдрома МЖ и дают косвенные результаты, не всегда отражающие степень нарушения функционального состояния печени при МЖ [12].

Т.к. понимание степени изменений функционального состояния печени является важным для планирования дальнейшей тактики лечения, вопрос поиска новых диагностических критериев и разработки относительно простой технической реализации устройства для внедрения в клиническую практику дополнительных объективных методов оценки, остается актуальным. В качестве подходящих могут выступать методы оптической диагностики, показавшие свою высокую скорость и производительность, безопасность и экономическую выгоду в том числе в исследованиях для задач хирургии [13–19]. Также стоит

отметить, что спектроскопические методы продемонстрировали возможность внедрения в стандартные хирургические инструменты с помощью волоконно-оптических зондов [17,20–22].

В рамках мультимодального подхода известно комплементарное применение методов флуоресцентной спектроскопии (ФС) и спектроскопии диффузного отражения (СДО). ФС основана на освещении монохроматическим излучением УФ или видимого диапазона с последующей регистрацией флуоресценции эндогенных или экзогенных флуорофоров [19]. Оценка вклада и изменений флуоресценции определенных биомаркеров позволяет определить характер и степень метаболических и структурных изменений тканей [23,24]. СДО использует явление диффузного отражения света в широком видимом или ближнем ИК диапазоне от структур биологической ткани [25]. Аналогично ФС, изменения содержания в тканях ряда хромофоров (вода, гемоглобин, липиды и т.д.) указывает на структурные изменения, а также позволяет рассчитать индексы содержания этих веществ и тканевую сатурацию [26,27]. Сочетание методов, регистрирующих *in vivo* изменения флуоресценции, связанные с динамикой метаболических процессов в митохондриях, и нарушения кровенаполнения и степени насыщения кислородом крови в тканях, ведущие в свою очередь к метаболическим нарушениям, позволяет оценивать происходящие в биологических тканях процессы комплексно и взаимосвязанно [28,29].

Методы ФС и СДО открывают возможности для повышения информативности существующих диагностических алгоритмов оценки функционального состояния печени у пациентов с синдромом МЖ за счёт получения диагностической информации напрямую и выбора на её основе персонализированной тактики лечения. Таким образом, целью данной работы явилось повышение качества лечения пациентов с МЖ за счет выявления новых диагностических критериев функционального состояния печени и возможности прогнозирования динамики состояния больных после антеградной билиарной декомпрессии посредством разработки метода и устройства диагностики на основе технологий ФС и СДО.

### **Материалы и методы**

Для реализации поставленной цели были проведены экспериментальные исследования на базе отделения рентгенохирургических методов диагностики и лечения Орловской областной клинической больницы (г. Орел, Россия). Исследование было одобрено Этическим комитетом Орловского государственного университета (протокол заседания № 14 от 24.01.2019). В исследовании приняли участие 40 пациентов (из них 30 человек – со злокачественными новообразованиями гепатопанкреатодуodenальной зоны, 8 человек – с желчнокаменной болезнью, 2 человека – с кистой головки поджелудочной железы) в возрасте  $66 \pm 13$  лет с синдромом МЖ различной этиологии и степени тяжести. Пациенты подписывали информированное согласие, указывающее на их добровольную готовность участвовать в исследовании. Оптические измерения проводились во время выполнения антеградной декомпрессии желчевыводящих путей под ультразвуковым и рентгенологическим контролем. Далее на основании данных клинического наблюдения, лабораторных и инструментальных методов исследования исследований, заключительного диагноза пациенты были ретроспективно разделены на две группы – с положительной или отрицательной динамикой состояния после билиарной декомпрессии.

На основании ранее проведенных исследований по оценке оптических свойств и спектров диффузного отражения печени при моделировании изменений содержания тканевых хромофоров при патологических состояниях [30], а также оценки чувствительности экспериментальной установки ФС с предполагаемой конфигурацией волоконно-оптического зонда к метаболическим изменениям в тканях [31], были сформулированы медико-технические требования, а далее разработано устройство, реализующее методы ФС и СДО.

В качестве источников излучения в измерительном канале ФС использовались светодиод 365 нм и лазерный диод 450 нм. Мощность излучения на торце волоконно-оптического зонда не превышала 0,2 мВт, исходя из требований безопасности для монохроматического излучения на данных длинах волн [32,33], а также для исключения эффекта фотообесцвечивания, который может исказить результаты измерений. В качестве источника в канале СДО использовался широкополосный галогенный источник HL-2000-FHSA (Ocean Optics, США) 360-2400 нм. Спектры регистрировали с помощью ПЗС-спектрометра FLAME T-VIS-NIR-ES (Ocean Optics, США) в диапазоне 350-1000 нм после ослабления обратного рассеянного излучения от источников фильтрами FGL400 и FGL495

(Thorlabs Inc., США), пропускающими сигнал выше длины волн 400 нм и 495 нм, соответственно. Оптическое излучение доставлялось с помощью специально разработанного волоконно-оптического зонда диаметром 1 мм, совместимого с пункционными иглами 17,5 G с дистальным торцевым скосом 20°. Зонд содержит в себе одно центральное волокно диаметром 200 мкм для сбора излучения к спектрометру и по 3 волокна 100 мкм (суммарно 9 волокон вокруг центрального) для доставки излучения от каждого из источников.

Устройство работает следующим образом (рисунок 1). Перед началом измерений выбирается источник излучения – светодиод 365 нм или лазерный диод 450 нм для канала ФС, широкополосный источник – для канала СДО. Включение источников управляется персональным компьютером (ПК) через микроконтроллер и интерфейс USB. Микроконтроллер подает на блок управления сигнала включения необходимого источника излучения. Оптическое излучение поступает к биологической ткани через волоконно-оптический зонд, возбуждая автофлуоресценцию флуорофоров или рассеиваясь и поглощаясь хромофорами. Излучение от ткани собирается центральным оптическим волокном зонда и проходит через светофильтр. При измерениях методом СДО светофильтр убирается. Далее излучение поступает в спектрометр, в котором раскладывается в спектр в полихроматоре и преобразуется в электрический сигнал на ПЗС-матрице. Далее сигнал после оцифровывания передается на ПК для дальнейшего анализа и отображения. Время экспозиции для измерения спектра на одной длине волны составляло максимум 1,5 с.

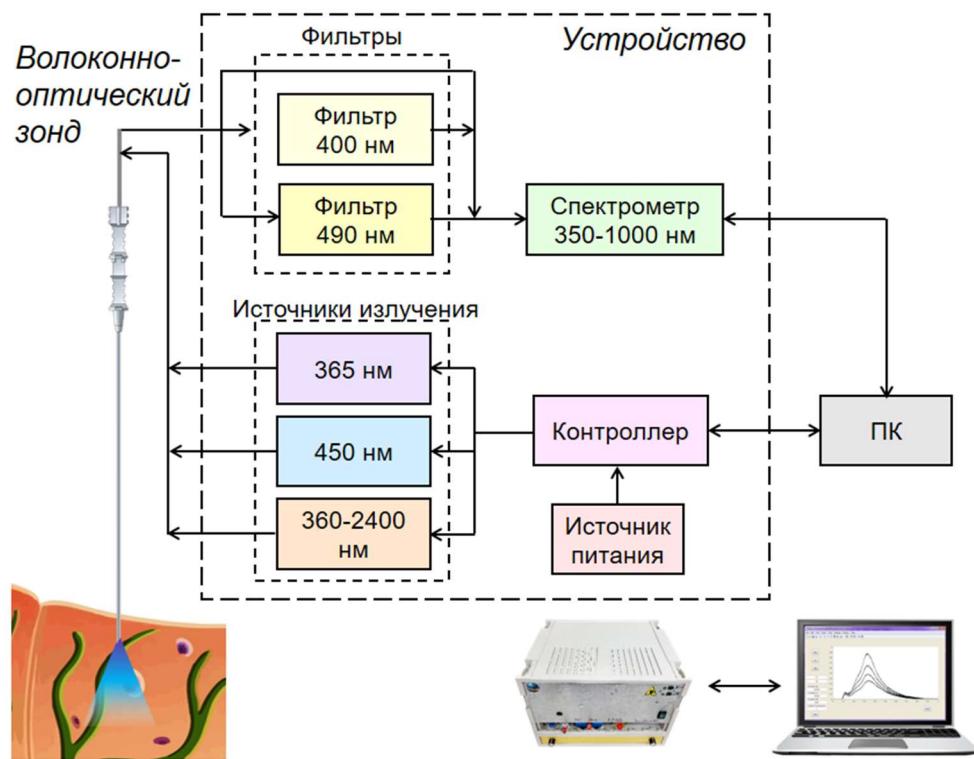


Рисунок 1 – Функциональная схема устройства мультимодальной диагностики функционального состояния печени

Для каждого пациента записывается пять спектров флуоресценции и диффузного отражения на каждой длине волны в 1-2 точках исследования. Спектры флуоресценции подвергались деконволюции для выделения вкладов флуоресценции основных тканевых флуорофоров (никотинамидадениндинуклеотид и никотинамидадениндинуклеотидфосфат (НАД(Ф)Н), флавины, билирубин, витамин А, липофусцин, порфирины и др.), а также проводился расчет площадей под кривой спектра в нескольких диапазонах. Сочетания кривых флуорофоров и анализируемые параметры были подобраны в проведенных ранее исследованиях [34]. Из спектров СДО и известных данных об оптических свойствах окси- и дезоксигемоглобина в ИК-диапазоне рассчитывалось значение тканевой сатурации [26].

Для интерпретации различий между исследуемыми группами, а также для классификации новых объектов при проведении последующих исследований были построены

модели классификации. Для выявления признаков, наилучшим образом разделяющих объекты по предполагаемой положительной или отрицательной динамике состояния после билиарной декомпрессии, применялся линейный дискриминантный анализ (ЛДА).

### Результаты и обсуждение

По результатам экспериментальных исследований были выявлены изменения во вкладах флуоресценции как участвующих в метаболических реакциях флуорофоров (НАД(Ф)Н, флавины), так и веществ, в целом отражающих развитие патологических процессов в печени (билирубин, витамин А, липофусцин, порфирины). Спектральные параметры флуорофоров (высота и площадь гауссовых кривых, площадь под кривой спектра в нескольких диапазонах), а также данные тканевой сатурации были использованы для поиска диагностических критериев. Результатом ЛДА являлась дискриминантная функция, которая должна обеспечивать высокую чувствительность и специфичность и допустимый уровень ошибки 1 рода (вероятности ложноотрицательного результата).

Для выбора наиболее подходящего критерия оценивались показатели чувствительности, специфичности и точности. Исходя из наиболее высоких значений показателей были выбраны две пары дискриминантных переменных:

1) площади гауссовых кривых двух пиков флуоресценции билирубина в спектрах ФС на длине волны 365 и 450 нм;

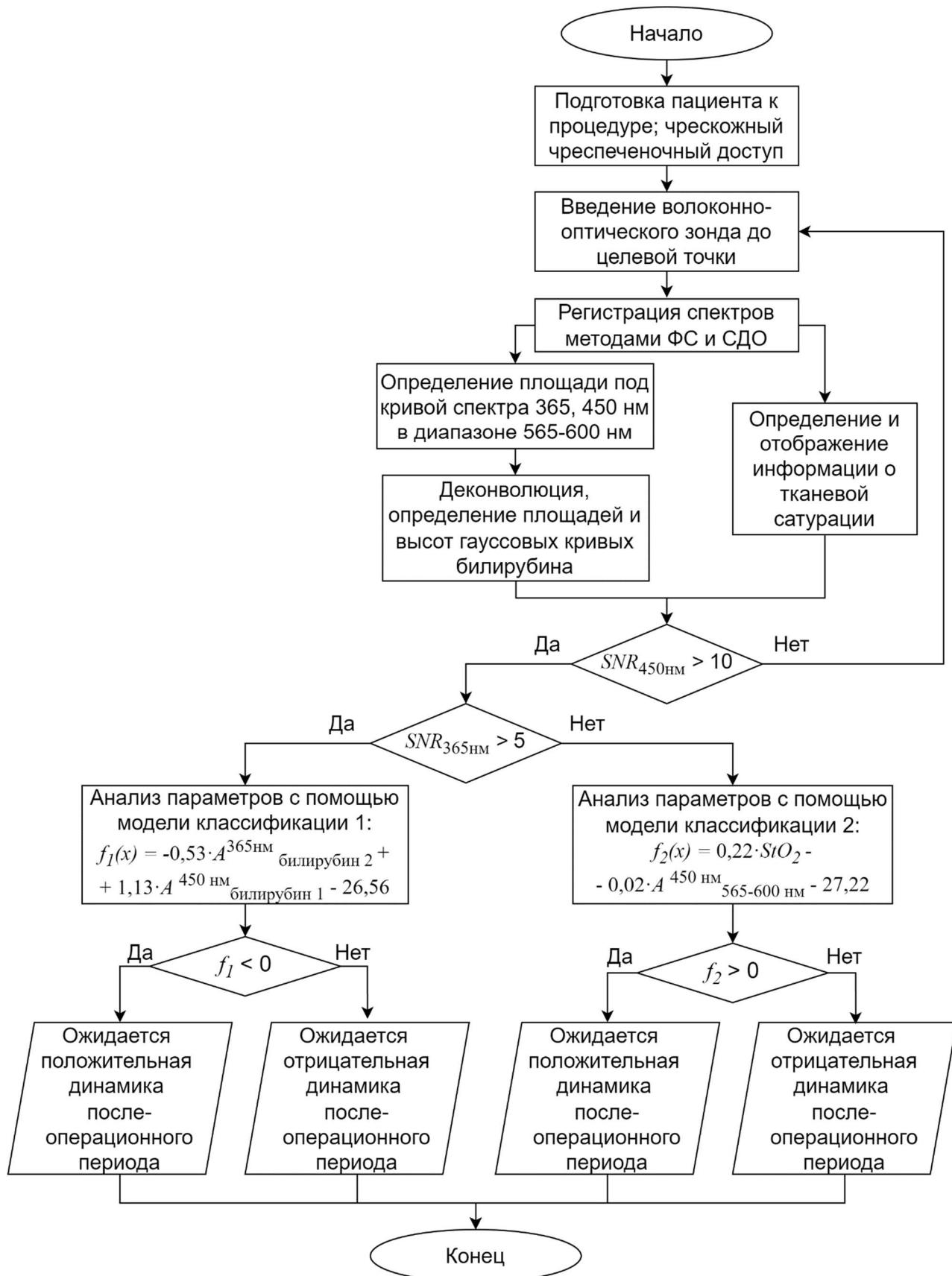
2) площадь спектра флуоресценции возбужденного излучением 450 нм, в диапазоне 565-500 нм, и тканевая сатурация ткани печени.

Таким образом, применение каждого измерительного канала разработанного устройства позволило синтезировать решающие правила для выявления пациентов с положительной и отрицательной динамикой лечения на фоне билиарной декомпрессии с чувствительностью и специфичностью не менее 0,85 и 0,89, соответственно [35].

Итоговые модели классификации на основе выбранных параметров были включены в разработанный алгоритм метода диагностики функционального состояния печени пациентов с синдромом МЖ различной этиологии и степени тяжести. Алгоритм предназначен для выявления пациентов с ПН и прогнозирования отрицательной динамики течения послеоперационного периода на основании данных измерительных каналов ФС и СДО уже на этапе проведения первичной антеградной декомпрессии желчевыводящих путей под ультразвуковым и рентгенологическим контролем. Выбор включения в алгоритм сочетаний параметров, получаемых разными оптическими методами, обусловлен предоставлением возможности врачу-хирургу оценки разных сторон функционального состояния паренхимы печени как в пределах одного метода (ФС на разных длинах волн возбуждения), так и в мультимодальном подходе (ФС и СДО), исходя из индивидуальных особенностей пациента. Немаловажным фактором является и то, что во второй классификатор включен, рассчитанный методом СДО, физиологический параметр тканевой сатурации. Также, несмотря на то, что модель классификации на основе метода ФС обеспечивает более низкий уровень ложноотрицательного результата, в ходе исследования наблюдалось, что регистрация данных каналом ФС с источником излучения 365 нм могла быть затруднена из-за повышенного кровенаполнения печени [36].

Предлагаемый метод оценки функционального состояния печени пациентов с МЖ предполагает последовательность действий, представленную на рисунке 2.

В начале процедуры первичной антеградной билиарной декомпрессии под ультразвуковым контролем врач обеспечивает чрескожный доступ к желчевыводящим путям через паренхиму печени. Волоконно-оптический зонд под ультразвуковым контролем вводится в канюлю пункционной иглы, расположенной на траектории проведения инструмента в паренхиме печени перед стенкой желчного протока. С помощью метода ФС и СДО последовательно регистрируют спектры флуоресценции и диффузного отражения паренхимы печени. В зарегистрированных спектрах рассчитываются параметры, входящие в дискриминантные функции, а также для врача выводится информация о тканевой сатурации печени. Далее для выбора решающего правила проверяется качество зарегистрированных данных канала ФС для длины волны возбуждения 450 нм. Проверка осуществляется путем расчета соотношения сигнал-шум на длине волны максимальной интенсивности флуоресценции данных спектров (signal-to-noise ratio, на рисунке 2 обозначено как  $SNR_{450\text{nm}}$ ). Данный параметр и его оптимальные значения для различных спектров были выбраны с учетом более низких интенсивностей флуоресценции по сравнению с каналом 450 нм.



**Рисунок 2 – Схема алгоритма метода оценки функционального состояния печени пациентов с синдромом МЖ методами ФС и СДО**

В случае  $SNR_{450\text{нм}} > 10$  перед использованием первого решающего правила также проводится аналогичная проверка данных канала ФС для длины волны возбуждения 365 нм путем расчета соотношения сигнал-шум на длине волны максимальной интенсивности

флуоресценции спектров ( $SNR_{365\text{нм}}$ ). В случае  $SNR_{365\text{нм}} > 5$  проводится анализ расчитанных параметров с помощью первой модели классификации и делается вывод о предполагаемой динамике состояния пациента. В случае  $SNR_{365\text{нм}} < 5$  анализ данных и получение вывода продолжается с использованием второго классификатора. В случае  $SNR_{450\text{нм}} < 10$  врач-хирург перемещает волоконно-оптический зонд в другую возможную точку измерения и цикл измерения повторяется.

Таким образом, по результатам расчета делаются выводы о тяжести МЖ и предполагаемой динамике состояния пациентов после первичной антеградной декомпрессии желчевыводящих путей и данная дополнительная диагностическая информация передается врачу-хирургу.

На основании разработанного метода диагностики и на основе теории синтеза биотехнических систем (БТС) синтезирована БТС диагностики функционального состояния печени (рисунок 3) пациентов с синдромом МЖ различной этиологии и степени тяжести для выявления пациентов с ПН и прогнозирования отрицательной динамики течения послеоперационного периода при проведении первичной антеградной декомпрессии желчевыводящих путей под ультразвуковым и рентгенологическим контролем.



*Рисунок 3 – Биотехническая система оценки функционального состояния печени пациентов с синдромом МЖ*

БТС работает следующим образом. Во время первичной антеградной билиарной декомпрессии под ультразвуковым контролем врач с помощью пункционной иглы обеспечивает чреспечевый доступ к паренхиме печени, через который вводится волоконно-оптический зонд. Далее проводится последовательная регистрация спектров флуоресценции и диффузного отражения с помощью устройства флуоресцентно-отражательной спектроскопии, управляемого с ПК. После окончания измерения проводится расчет параметров из данных ФС и СДО по предложенному алгоритму. Сразу после измерения и расчета параметров на экране ПК для врача отображается информация о значении тканевой сатурации. Далее полученные данные подставляются в одну из моделей классификации, при помощи которых формируется вывод о прогнозе положительной или отрицательной динамики состояния пациента после оперативного вмешательства. Результаты исследования отображаются на экране ПК и передаются врачу, который принимает решение о дальнейшей тактике лечения данного пациента.

## Заключение

Таким образом, на основе полученных в ходе исследований результатов предложен метод диагностики функционального состояния печени пациентов с синдромом МЖ и принцип построения мультимодального устройства ФС и СДО для использования во время

проведения антеградной декомпрессии желчных протоков под ультразвуковым и рентгенологическим контролем. Разработанный метод диагностики функционального состояния печени обеспечивает прогнозирование развитие отрицательной динамики состояния пациента в послеоперационном периоде билиарной декомпрессии с показателями чувствительности и специфичности не менее 0,85 и 0,89 соответственно, что позволяет снизить вероятность ложноотрицательного результата диагностики и индивидуально корректировать тактику лечения пациента для достижения лучших результатов лечения.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 23-25-00487, <https://rscf.ru/en/project/23-25-00487>.*

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Натальский, А.А. Современные представления о печеночной недостаточности в хирургии / А.А. Натальский, С.В. Тарасенко, О.В. Зайцев, О.Д. Песков // Российский медико-биологический вестник имени академика И.П. Павлова. – 2014. – 22(4). – С. 138-147.
2. Багненко, С.Ф. Механическая желтуха: маршрутизация, диагностика, тактика лечения / С.Ф. Багненко, А.Ю. Корольков, Д.Н. Попов, С.А. Шаталов, Л.А. Логгин // Анналы хирургической гепатологии. – 2023. – 28(4). – С. 24-31.
3. Van der Gaag, N.A. Preoperative biliary drainage in patients with obstructive jaundice: history and current status / N.A. van der Gaag, J.J. Kloek, S.M.M. de Castro, O.R.C. Busch, T.M. van Gulik, D.J. Gouma // J. Gastrointest. Surg. – 2009. – 13(4). – P. 814-820.
4. Pavlidis, E.T. Pathophysiological consequences of obstructive jaundice and perioperative management / E.T. Pavlidis, T.E. Pavlidis // Hepatobiliary Pancreat. Dis. Int. – 2018. – 17(1). – P. 17-21.
5. Lukmonov, S. Minimally invasive biliary decompression methods in management of obstructive jaundice of malignant etiology / S. Lukmonov // HPB. – 2018. – 20. – P. S730.
6. Moole, H. Efficacy of preoperative biliary drainage in malignant obstructive jaundice: a meta-analysis and systematic review / H. Moole, M. Bechtold, S.R. Puli // World J. Surg. Oncol. – 2018. – 14(1). – P. 1-11.
7. Shaib, Y. Preoperative biliary drainage for malignant biliary obstruction: results from a national database / Y. Shaib, M.A. Rahal, M.O. Rammal, A. Mailhac, H. Tamim // J. Hepato-Biliary-Pancreatic Sci. – 2017. – 24(11). – P. 637-642.
8. Galperin, E.I. Obstructive jaundice—a “false stable” condition, consequences of a “second hit”, management principles / E.I. Galperin // Ann. khirurgicheskoy hepatologii= Ann. HPB Surg. – 2011. – 16(3). – P. 16-25.
9. Барванин, Г.М. Выбор способа хирургической декомпрессии желчных путей при нерезектабельных опухолях билиопанкреатодуodenальной зоны / Г.М. Барванин // Анналы хирургической гепатологии. – 2016. – 21(4). – С. 55-62.
10. Kumar, S. Factors predicting recovery of liver function after percutaneous drainage in malignant biliary obstruction: the role of hospital-acquired biliary sepsis / S. Kumar, S. Masood, U. Srivastava, S.M. Madhavan, S. Chauhan, A. Pandey // Clin. Exp. Hepatol. – 2020. – 6(4). – P. 295-303.
11. Sha, J. A prospective study of risk factors for in-hospital mortality in patients with malignant obstructive jaundice undergoing percutaneous biliary drainage / J. Sha, Y. Dong, H. Niu // Medicine (Baltimore). – 2019. – 98(15). – P. e15131.
12. Scheufele, F. INR and not bilirubin levels predict postoperative morbidity in patients with malignant obstructive jaundice / F. Scheufele, L. Aichinger, C. Jäger, I.E. Demir, S. Schorn, E. Demir, M. Sargut, H. Friess, G.O. Ceyhan // Am. J. Surg. – 2021. – 222(5). – P. 976-982.
13. Croce, A.C. Autofluorescence spectroscopy and imaging: A tool for biomedical research and diagnosis / A.C. Croce, G. Bottiroli // Eur. J. Histochem. – 2014. – 58(4). – P. 320-337.
14. Жеребцов, Е.А. Флуоресцентная диагностика митохондриальной функции в эпителиальных тканях in vivo: монография / Е.А. Жеребцов, В.В. Дрёмин, А.И. Жеребцова, Е.В. Потапова, А.В. Дунаев. – Орёл: ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», 2018. – 107 с.
15. Дунаев, А.В. Мультимодальная оптическая диагностика микроциркуляторно-тканевых систем организма человека: монография / А.В. Дунаев. – Старый Оскол: ТНТ, 2022. – 440 с.
16. Kim, J.A. Optical spectroscopy for in vivo medical diagnosis—a review of the state of the art and future perspectives / J.A. Kim, D.J. Wales, G.-Z. Yang // Prog. Biomed. Eng. – 2020. – 2(4). – P. 42001.
17. Dremin, V. Optical percutaneous needle biopsy of the liver: a pilot animal and clinical study / V. Dremin, E. Potapova, E. Zherebtsov, K. Kandurova, V. Shupletsov, A. Alekseyev, A. Mamoshin, A. Dunaev // Sci. Rep. – 2020. – 10(1). – P. 14200.
18. Zherebtsov, E.A. Fluorescence lifetime optical biopsy discriminates hepatocellular carcinoma / E.A. Zherebtsov, E.V. Potapova, A.V. Mamoshin, V.V. Shupletsov, K.Y. Kandurova, V.V. Dremin, A.Y. Abramov, A.V. Dunaev // Biomed. Opt. Express. – 2022. – 13(2). – P. 633-646.
19. Alfano, R. Optical biopsy for cancer detection / R. Alfano, Y. Pu // Lasers for Medical Applications. – Woodhead Publishing, 2013. – P. 325-367.
20. Spliethoff, J.W. In vivo characterization of colorectal metastases in human liver using diffuse reflectance spectroscopy: Toward guidance in oncological procedures / J.W. Spliethoff, L.L. de Boer, M.A. Meier, W. Prevoo, J. de Jong, K. Kuhlmann, T.M. Bydlon, H.J. Sterenborg, B.H. Hendriks, T.J. Ruers // J. Biomed. Opt. – 2016. – 21(9). – P. 97004.
21. Braun, F. A customized multispectral needle probe combined with a virtual photometric setup for in vivo detection of Lewis lung carcinoma in an animal model / F. Braun, R. Schalk, M. Nachtmann, A. Hien, R. Frank, T. Beuermann, F.-J. Methner, B. Kränzlin, M. Rädle, N. Gretz // Meas. Sci. Technol. – 2019. – 30(10). – P. 104001.
22. Kandurova, K. Fiber-optic system for intraoperative study of abdominal organs during minimally invasive surgical interventions / K. Kandurova, V. Dremin, E. Zherebtsov, E. Potapova, A. Alyanov, A. Mamoshin, Y. Ivanov, A.

- Borsukov, A. Dunaev // Appl. Sci. – 2019. – 9(2). – P. 217.
23. Croce, A.C. Light and autofluorescence, multitasking features in living organisms / A.C. Croce // Photochem. – 2021. – 1(2). – P. 67-124.
24. Poulon, F. Real-time Brain Tumor imaging with endogenous fluorophores: a diagnosis proof-of-concept study on fresh human samples / F. Poulon, J. Pallud, P. Varlet, M. Zanello, F. Chretien, E. Dezamis, G. Abi-Lahoud, F. Nataf, B. Turak, B. Devaux, D.A. Haidar // Sci. Rep. – 2018. – 8(1). – P. 1-11.
25. Potapova, E.V. Evaluation of microcirculatory disturbances in patients with rheumatic diseases by the method of diffuse reflectance spectroscopy / E.V. Potapova, V.V. Dremin, E.A. Zhrebtssov, I.N. Makovik, A.I. Zhrebtsova, A.V. Dunaev, K.V. Podmasteryev, V.V. Sidorov, A.I. Krupatkin, L.S. Khakhicheva, V.F. Muradyan // Hum. Physiol. – 2017. – 43(2). – P. 222-228.
26. Spott, T. Application of optical diffusion theory to transcutaneous bilirubinometry / T. Spott, L.O. Svaasand, R.E. Anderson, P.F. Schmedling // Proceedings of SPIE. – 1998. – 3195. – P. 234-245.
27. Strattonnikov, A.A. Evaluation of blood oxygen saturation in vivo from diffuse reflectance spectra / A.A. Strattonnikov, V.B. Loschenov // J. Biomed. Opt. – 2001. – 6(4). – P. 457-468.
28. Lee, S.Y. Characterizing human pancreatic cancer precursor using quantitative tissue optical spectroscopy / S.Y. Lee, W.R. Lloyd, M. Chandra, R.H. Wilson, B. McKenna, D. Simeone, J. Scheiman, M.A. Mycek // Biomed. Opt. Express. – 2013. – 4(12). – P. 2828-2834.
29. Shi, H. Early identification of acute hypoxia based on brain NADH fluorescence and cerebral blood flow / H. Shi, N. Sun, A. Mayevsky, Z. Zhang, Q. Luo // J. Innov. Opt. Health Sci. – 2014. – 7(2). – P. 1450033.
30. Kandurova, K. Optical Properties of Perfused Rat Liver Tissues / K. Kandurova, A. Palalov, E. Seryogina, V. Dremin, A. Dunaev, E. Potapova // J. Biomed. Photonics Eng. – 2023. – 9(1). – P. 10301.
31. Кандурова, К.Ю. Апробация тонкоигольного оптического зонда для регистрации изменений флуоресценции коферментов клеточного дыхания / К.Ю. Кандурова, Е.В. Потапова, Е.А. Жеребцов, В.В. Дрёмин, Е.С. Серёгина, А.Ю. Винокуров, А.В. Мамошин, А.В. Борсуков, Ю.В. Иванов, А.В. Дунаев // Оптика и спектроскопия. – 2020. – 128(6). – С. 736-745.
32. The International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. ICNIRP guidelines on limits of exposure to laser radiation of wavelengths between 180 nm and 1,000 μm // Health Phys. – 2013. – 105(3). – P. 271-295.
33. The International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines on Limits of Exposure to Ultraviolet Radiation of Wavelengths Between 180 nm and 400 nm (Incoherent Optical Radiation) // Health Phys. – 2004. – 87(2). – P. 171-186.
34. Kandurova, K.Y. Deconvolution of the fluorescence spectra measured through a needle probe to assess the functional state of the liver / K.Y. Kandurova, D.S. Sumin, A.V. Mamoshin, E.V. Potapova // Lasers Surg. Med. – 2023. – 55(7). – P. 690-701.
35. Кандурова, К.Ю. Возможности флуоресцентно-отражательной спектроскопии для классификации функционального состояния печени пациентов с механической желтухой / К.Ю. Кандурова, А.В. Мамошин, Е.В. Потапова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2024. – 5(367). – С. 164-173.
36. Кандурова, К.Ю. Спектрофотометрические исследования оптических характеристик печени и желчи в диапазоне 350-1300 нм / К.Ю. Кандурова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2023. – 5(361). – С. 117-126.

**Кандурова Ксения Юрьевна**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл  
Аспирант кафедры приборостроения, метрологии и сертификации, стажер-исследователь научно-технологического центра биомедицинской фотоники 302020, г. Орел, Наугорское ш, 29  
E-mail: k.kandurova@oreluniver.ru

**Потапова Елена Владимировна**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл  
Кандидат технических наук, доцент кафедры приборостроения, метрологии и сертификации, старший научный сотрудник научно-технологического центра биомедицинской фотоники 302020, г. Орел, Наугорское ш, 29  
E-mail: potapova\_ev\_ogu@mail.ru

**Мамошин Андриан Валерьевич**

ФГБУ «НМИЦ хирургии им. А.В. Вишневского» Минздрава России, г. Москва  
Доктор медицинских наук, доцент, старший научный сотрудник отделения абдоминальной хирургии 117997, г. Москва, ул. Большая Серпуховская, 27  
БУЗ Орловской области «Орловская областная клиническая больница», г. Орёл  
Врач-хирург 302028, г. Орел, б-р Победы, 10  
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл  
Старший научный сотрудник научно-технологического центра биомедицинской фотоники, профессор кафедры специализированных хирургических дисциплин 302020, г. Орел, Наугорское ш., 29  
E-mail: dr.mamoshin@mail.ru

---

KANDUROVA K.Y., MAMOSHIN A.V., POTAPOVA E.V.

**METHOD AND DEVICE FOR MULTIMODAL DIAGNOSIS OF LIVER FUNCTIONAL STATE BASED ON FLUORESCENCE AND REFLECTANCE SPECTROSCOPY**

**Abstract.** The article discusses the method of diagnostics of the functional state of the liver in patients with obstructive jaundice syndrome based on the application of the multimodal device of fluorescence spectroscopy and diffuse

reflectance spectroscopy. The developed method was tested in clinics during antegrade decompression of bile ducts under ultrasound and X-ray control. According to the results of the studies, the classification model based on linear discriminant analysis was developed to predict the negative dynamics of the patients condition in the postoperative period of biliary decompression with sensitivity and specificity of at least 0.85 and 0.89, respectively.

**Keywords:** liver, obstructive jaundice, liver failure, fluorescence spectroscopy, diffuse reflectance spectroscopy.

## BIBLIOGRAPHY

1. Natalskiy, A.A. The modern concepts problems of liver failure in surgery / A.A. Natalskiy, S.V. Tarasenko, O.V. Zaytsev, O.D. Peskov // I.P. Pavlov Russian Medical Biological Herald. – 2014. – 22(4). – P. 138-147. (In Russ.).
2. Bagnenko, S.F. Obstructive jaundice: routing, diagnostics, treatment tactics / S.F. Bagnenko, A.Yu. Korolkov, D.N. Popov, S.A. Shatalov, L.A. Logvin // Annaly khirurgicheskoy hepatologii = Annals of HPB Surgery. – 2023. – 28(4). – P. 24-31. (In Russ.).
3. Van der Gaag, N.A. Preoperative biliary drainage in patients with obstructive jaundice: history and current status / N.A. van der Gaag, J.J. Kloek, S.M.M. de Castro, O.R.C. Busch, T.M. van Gulik, D.J. Gouma // J. Gastrointest. Surg. – 2009. – 13(4). – P. 814-820.
4. Pavlidis, E.T. Pathophysiological consequences of obstructive jaundice and perioperative management / E.T. Pavlidis, T.E. Pavlidis // Hepatobiliary Pancreat. Dis. Int. – 2018. – 17(1). – P. 17-21.
5. Lukmonov, S. Minimally invasive biliary decompression methods in management of obstructive jaundice of malignant etiology / S. Lukmonov // HPB. – 2018. – 20. – P. S730.
6. Moole, H. Efficacy of preoperative biliary drainage in malignant obstructive jaundice: a meta-analysis and systematic review / H. Moole, M. Bechtold, S.R. Puli // World J. Surg. Oncol. – 2018. – 14(1). – P. 1-11.
7. Shaib, Y. Preoperative biliary drainage for malignant biliary obstruction: results from a national database / Y. Shaib, M.A. Rahal, M.O. Rammal, A. Mailhac, H. Tamim // J. Hepato-Biliary-Pancreatic Sci. – 2017. – 24(11). – P. 637-642.
8. Galperin, E.I. Obstructive jaundice—a “false stable” condition, consequences of a “second hit”, management principles / E.I. Galperin // Ann. khirurgicheskoy hepatologii= Ann. HPB Surg. – 2011. – 16(3). – P. 16-25.
9. Barvanyan, G.M. Choice of Palliative Surgical Biliary Decompression for Inoperable Biliopancreatoduodenal Tumors / G.M. Barvanyan // Ann. khirurgicheskoy hepatologii= Ann. HPB Surg. – 2016. – 21(4). – P. 55-62. (In Russ.).
10. Kumar, S. Factors predicting recovery of liver function after percutaneous drainage in malignant biliary obstruction: the role of hospital-acquired biliary sepsis / S. Kumar, S. Masood, U. Srivastava, S.M. Madhavan, S. Chauhan, A. Pandey // Clin. Exp. Hepatol. – 2020. – 6(4). – P. 295-303.
11. Sha, J. A prospective study of risk factors for in-hospital mortality in patients with malignant obstructive jaundice undergoing percutaneous biliary drainage / J. Sha, Y. Dong, H. Niu // Medicine (Baltimore). – 2019. – 98(15). – P. e15131.
12. Scheufele, F. INR and not bilirubin levels predict postoperative morbidity in patients with malignant obstructive jaundice / F. Scheufele, L. Aichinger, C. Jäger, I.E. Demir, S. Schorn, E. Demir, M. Sargut, H. Friess, G.O. Ceyhan // Am. J. Surg. – 2021. – 222(5). – P. 976-982.
13. Croce, A.C. Autofluorescence spectroscopy and imaging: A tool for biomedical research and diagnosis / A.C. Croce, G. Bottiroli // Eur. J. Histochem. – 2014. – 58(4). – P. 320-337.
14. Zhrebtssov, E.A. Fluorescentnaya diagnostika mitokondrialnoy funktsii v epithelialnykh tkanyakh in vivo: monografiya / E.A. Zhrebtssov, V.V. Dremin, A.I. Zhrebtsova, E.V. Potapova, Zhrebtssov. – Orel: FGBOU VO «OGU imeni I.S. Turgeneva», 2018. – 107 p. (In Russ.).
15. Dunaev, A.V. Multimodalnaya opticheskaya diagnostika mikrotsirkulyatorno-tkanevykh sistem organizma cheloveka: monografiya / A.V. Dunaev. – Staryy Oskol: TNT, 2022. – 440 p. (In Russ.).
16. Kim, J.A. Optical spectroscopy for in vivo medical diagnosis—a review of the state of the art and future perspectives / J.A. Kim, D.J. Wales, G.-Z. Yang // Prog. Biomed. Eng. – 2020. – 2(4). – P. 42001.
17. Dremin, V. Optical percutaneous needle biopsy of the liver: a pilot animal and clinical study / V. Dremin, E. Potapova, E. Zhrebtssov, K. Kandurova, V. Shupletsov, A. Alekseyev, A. Mamoshin, A. Dunaev // Sci. Rep. – 2020. – 10(1). – P. 14200.
18. Zhrebtssov, E.A. Fluorescence lifetime needle optical biopsy discriminates hepatocellular carcinoma / E.A. Zhrebtssov, E.V. Potapova, A.V. Mamoshin, V.V. Shupletsov, K.Y. Kandurova, V.V. Dremin, A.Y. Abramov, A.V. Dunaev // Biomed. Opt. Express. – 2022. – 13(2). – P. 633-646.
19. Alfano, R. Optical biopsy for cancer detection / R. Alfano, Y. Pu // Lasers for Medical Applications. – Woodhead Publishing, 2013. – P. 325-367.
20. Spliethoff, J.W. In vivo characterization of colorectal metastases in human liver using diffuse reflectance spectroscopy: Toward guidance in oncological procedures / J.W. Spliethoff, L.L. de Boer, M.A. Meier, W. Prevoo, J. de Jong, K. Kuhlmann, T.M. Bydlon, H.J. Sterenborg, B.H. Hendriks, T.J. Ruers // J. Biomed. Opt. – 2016. – 21(9). – P. 97004.
21. Braun, F. A customized multispectral needle probe combined with a virtual photometric setup for in vivo detection of Lewis lung carcinoma in an animal model / F. Braun, R. Schalk, M. Nachtmann, A. Hien, R. Frank, T. Beuermann, F.-J. Methner, B. Kränzlin, M. Rädle, N. Gretz // Meas. Sci. Technol. – 2019. – 30(10). – P. 104001.
22. Kandurova, K. Fiber-optic system for intraoperative study of abdominal organs during minimally invasive surgical interventions / K. Kandurova, V. Dremin, E. Zhrebtssov, E. Potapova, A. Alyanov, A. Mamoshin, Y. Ivanov, A. Borsukov, A. Dunaev // Appl. Sci. – 2019. – 9(2). – P. 217.
23. Croce, A.C. Light and autofluorescence, multitasking features in living organisms / A.C. Croce // Photochem. – 2021. – 1(2). – P. 67-124.
24. Poulon, F. Real-time Brain Tumor imaging with endogenous fluorophores: a diagnosis proof-of-concept

study on fresh human samples / F. Poulon, J. Pallud, P. Varlet, M. Zanello, F. Chretien, E. Dezamis, G. Abi-Lahoud, F. Nataf, B. Turak, B. Devaux, D.A. Haidar // Sci. Rep. – 2018. – 8(1). – P. 1-11.

25. Potapova, E.V. Evaluation of microcirculatory disturbances in patients with rheumatic diseases by the method of diffuse reflectance spectroscopy / E.V. Potapova, V.V. Dremin, E.A. Zherebtsov, I.N. Makovik, A.I. Zherebtsova, A.V. Dunaev, K.V. Podmasteryev, V.V. Sidorov, A.I. Krupatkin, L.S. Khakhicheva, V.F. Muradyan // Hum. Physiol. – 2017. – 43(2). – P. 222-228.

26. Spott, T. Application of optical diffusion theory to transcutaneous bilirubinometry / T. Spott, L.O. Svaasand, R.E. Anderson, P.F. Schmedling // Proceedings of SPIE. – 1998. – 3195. – P. 234-245.

27. Strattonnikov, A.A. Evaluation of blood oxygen saturation in vivo from diffuse reflectance spectra / A.A. Strattonnikov, V.B. Loschenov // J. Biomed. Opt. – 2001. – 6(4). – P. 457-468.

28. Lee, S.Y. Characterizing human pancreatic cancer precursor using quantitative tissue optical spectroscopy / S.Y. Lee, W.R. Lloyd, M. Chandra, R.H. Wilson, B. McKenna, D. Simeone, J. Scheiman, M.A. Mycek // Biomed. Opt. Express. – 2013. – 4(12). – P. 2828-2834.

29. Shi, H. Early identification of acute hypoxia based on brain NADH fluorescence and cerebral blood flow / H. Shi, N. Sun, A. Mayevsky, Z. Zhang, Q. Luo // J. Innov. Opt. Health Sci. – 2014. – 7(2). – P. 1450033.

30. Kandurova, K. Optical Properties of Perfused Rat Liver Tissues / K. Kandurova, A. Palalov, E. Seryogina, V. Dremin, A. Dunaev, E. Potapova // J. Biomed. Photonics Eng. – 2023. – 9(1). – P. 10301.

31. Kandurova K.Yu. Testing a Fine-Needle Optical Probe for Recording Changes in the Fluorescence of Coenzymes of Cellular Respiration / K.Yu. Kandurova, E.V. Potapova, E.A. Zherebtsov, V.V. Dremin, E.S. Seryogina, A.Yu. Vinokurov, A.V. Mamoshin, A.V. Borsukov, Yu.V. Ivanov, A.V. Dunaev // Optics and Spectroscopy. – 2020. – 128(6). – P. 742-751.

32. The International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. ICNIRP guidelines on limits of exposure to laser radiation of wavelengths between 180 nm and 1,000 μm // Health Phys. – 2013. – 105(3). – P. 271-295.

33. The International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines on Limits of Exposure to Ultraviolet Radiation of Wavelengths Between 180 nm and 400 nm (Incoherent Optical Radiation) // Health Phys. – 2004. – 87(2). – P. 171-186.

34. Kandurova, K.Y. Deconvolution of the fluorescence spectra measured through a needle probe to assess the functional state of the liver / K.Y. Kandurova, D.S. Sumin, A.V. Mamoshin, E.V. Potapova // Lasers Surg. Med. – 2023. – 55(7). – P. 690-701.

35. Kandurova, K.Y. Vozmozhnosti fluorescensno-otrazhatelnoy spektroskopii dlya klassifikatsii funktsionalnogo sostoyaniya pecheni patsiyentov s mekhanicheskoy zheltukhoy / K.Y. Kandurova, A.V. Mamoshin, E.V. Potapova // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2024. – 5(367). – P. 164-173. (In Russ.)

36. Kandurova, K.Y. Spektrofotometricheskiye issledovaniya opticheskikh kharakteristik pecheni i zhelchi v diapazone 350-1300 nm / K.Y. Kandurova // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2023. – 5(361). – P. 117-126. (In Russ.)

**Kandurova Ksenia Yurievna**

Orel State University,  
Postgraduate Student of the Department of  
Instrumentation, Metrology and Certification, research  
assistant of Research & Development Center of  
Biomedical Photonics  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: k.kandurova@oreluniver.ru

**Potapova Elena Vladimirovna**

Orel State University,  
Ph.D., associate professor of the Department of  
Instrumentation, Metrology and Certification, senior  
researcher of Research and Development Center of  
Biomedical Photonics  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: e.potapova@oreluniver.ru

**Mamoshin Andrian Valerievich**

National Medical Research Center of Surgery named  
after A. Vishnevsky of the Ministry of Health of the  
Russian Federation  
Doctor of Medical Sciences, associate professor, senior  
researcher of Department of Abdominal Surgery  
117997, Moscow, Bolshaya Serpukhovskaya Street, 27  
Orel Regional Clinical Hospital, surgeon  
302028, Orel, Pobedy boulevard, 10  
Orel State University,  
Senior researcher of Research and Development Center  
of Biomedical Photonics, professor of the Department of  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: dr.mamoshin@mail.ru

© Кандурова К.Ю., Мамошин А.В., Потапова Е.В., 2024

ЖИДКОВ А.В., ПОДМАСТЕРЬЕВ К.В., ДЕНИСОВ Д.В., АБДУВОСИДОВ Х.А.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПЕДАНСА ТКАНЕЙ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ЧАСТОТЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

**Аннотация.** Предложена модель импеданса шеи человека, предназначенная для исследования биофизических процессов методом электроплетизмографии. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований импеданса тканей при частотах 50 и 100 кГц. Описаны методика проведения эксперимента, используемое оборудование и полученные результаты, подтверждающие адекватность предложенной модели при анализе кровенаполнения в сонной артерии.

**Ключевые слова:** импеданс биологических тканей, переменный ток, импедансная электроплетизмография, моделирование импеданса, кровоток в сонной артерии, диагностика сердечно-сосудистых заболеваний, электрическое сопротивление тканей.

### Введение

В последние годы заболевания сердечно-сосудистой и нервной систем приобретают все большую актуальность, что подтверждается статистическими данными за 2022 год, представленных на рисунке 1 [1].



*Рисунок 1 – Статистические данные заболеваемости людей в Российской Федерации на момент 2021 и 2022 года*

Как видно из диаграмм, болезни системы кровообращения составляют значительную часть всех заболеваний, зарегистрированных в 2022 году – 15,1 %. В эту категорию входят такие серьезные патологии, как тромбоз и атеросклероз, которые нередко приводят к инвалидности и летальному исходу. Трудность диагностики этих заболеваний обусловлена их скрытым течением на ранних стадиях, что требует применения высокоточных методов исследования. Не менее важны такие заболевания как мигрень и эпилепсия, входящие в категорию болезней нервной системы, составляющие 10,4 % от общего числа заболеваний. Эти патологии также отличаются сложностью диагностики и лечения, что связано с разнообразием симптомов и их непредсказуемым проявлением. При этом их протекание также в ряде случаев связано с сердечно-сосудистой системой [2], а последствия могут быть крайне тяжелыми, включая нарушение когнитивных функций, хроническую боль и значительное снижение качества жизни пациентов.

Одним из широко применяемых в настоящее время методов в области ангиологии является метод ультразвуковой допплерографии [3], для исследования сосудов применяют также такие методы, как цифровая субтракционная ангиография [4], компьютерно-томографическая ангиография [5] и магнитно-резонансная томография [6]. Однако несмотря на высокую технологичность и широкие возможности в исследовании и визуализации сосудов, эти методы не позволяют проводить длительный мониторинг показателей кровенаполнения по ряду объективных причин. К таким причинам можно отнести дороговизну применяемых технологий, чувствительность методов измерения к движению или даже незначительным вибрациям, сложности использования в качестве области направления персонализированной медицины, требующей самостоятельного использования медицинских устройств.

Некоторых из перечисленных недостатков лишены отечественные устройства, основанные на методе ультразвуковой допплерографии. Но, даже обладая портативностью и возможностью проведения длительного мониторинга на протяжении нескольких часов автономной работы, такие медицинские изделия сохраняют проблемы чувствительности используемого метода к движениям и вибрациям, сложности персонализированного применения без участия компетентного сотрудника. Кроме того, в ряде случаев, длительное ультразвуковое воздействие, особенно в области головного мозга, способно вызывать головную боль, а при неправильно подобранный интенсивности излучения негативно повлиять на кроветворную систему человека [7].

В качестве альтернативного решения предлагается электроплетизмографический метод [8], который может быть дополнительным методом для исследования сосудов и выявления патологий на ранней стадии. Принцип действия этого метода основан на измерении импеданса объекта при воздействии электрическим током высокой частоты. Изменение объема кровотока в сосудах приводит к изменению электропроводности тканей, что, в свою очередь, влияет на импеданс. Например, при уменьшении диаметра сосуда будет наблюдаться меньший объем кровотока, проходящий через него, и, следовательно, больший импеданс. Электроплетизмографический метод может позволить без вреда здоровью человека осуществлять длительный мониторинг кровенаполнения тканей с меньшей чувствительностью к движениям и вибрациям. При этом возможность применения аддитивных технологий для изготовления персонализированного крепления электродов для различных участков тела обеспечивает в перспективе создание автономных медицинских изделий, способных повысить качество скрининговых и профилактических осмотров.

Характерно, что частота переменного тока влияет на свойства ткани и ее проводимость. При уменьшении частоты увеличивается емкостное сопротивление тканей и увеличивается глубина зондирования тока. Основываясь на таких биофизических принципах, измерение импеданса в разных участках тела проводят на разных частотах. При измерении импеданса головы зондирующий ток выбирают с частотой 100 кГц, в то время как измерение импеданса конечностей проводится при частоте 30 кГц или 50 кГц [9]. В связи с выше изложенным, исследование импеданса тканей при различных частотах переменного тока представляет собой важное направление. При этом особенный интерес представляет оценка возможностей метода применительно к новым объектам исследования.

В рамках данной работы в качестве такого объекта исследования рассматривается шея, которая содержит в себе крупные магистральные артерии, несущие питательные вещества к головному мозгу и косвенно характеризующие в том числе и его работу. Мониторинг и выявление патологий сосудов в шее позволит повысить качество и продолжительность жизни людей, предотвращая развитие заболеваний на ранней стадии.

Для создания объективного и достоверного метода и средств мониторинга необходимы комплексные исследования объекта по обоснованию принятия ряда технических решений, включая обоснование частоты и амплитуды воздействующего электрического тока, расположения и геометрических размеров электродов и т.п. Необходимым условием проведения этих исследований является наличие модели, достоверно описывающей объект и позволяющей исследовать процессы, протекающие в нем.

Целью настоящей работы является создание модели импеданса шеи и проведение экспериментальных исследований по доказательству ее адекватности при различных значениях частоты электрического тока.

### Априорные данные для моделирования

Исследование импеданса тканей основывается на методе импедансной электроплетизмографии, который позволяет оценивать электрическое сопротивление различных биологических тканей при прохождении через них переменного тока.

Объектом исследования является шея, в которой находятся артерии, играющие ключевую роль в обеспечении кровоснабжения головного мозга. При моделировании шеи учитывается ее анатомические слои, через которые проходит электрический ток. На рисунке 2 представлен анатомический срез шеи, демонстрирующий расположение слоев тканей [10].

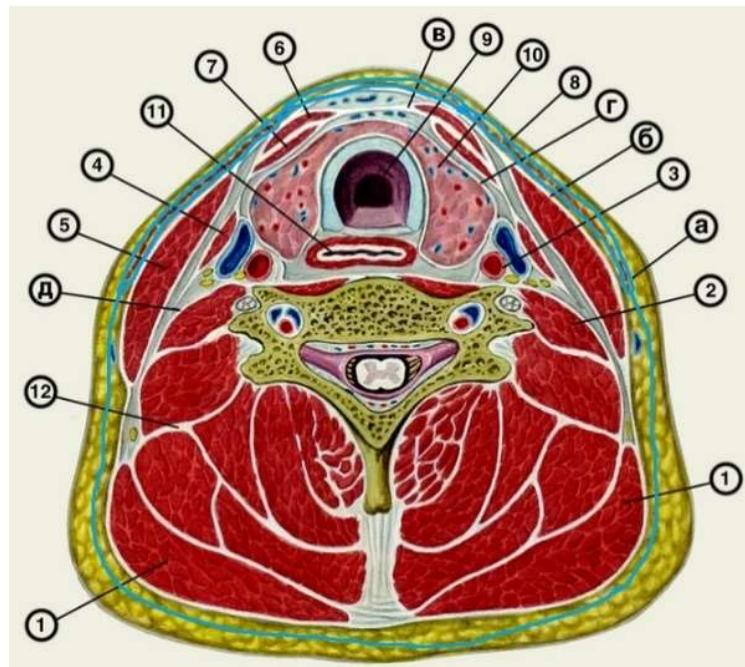


Рисунок 2 – Анатомический срез шеи

1 - трапециевидная мышца; 2 - передняя лестничная мышца; 3 - сосудисто-нервный пучок; 4 - лопаточно-подъязычная мышца; 5 - грудино-ключично-сосцевидная мышца; 6 - грудиноподъязычная мышца; 7 - грудинощитовидная мышца; 8 - подкожная мышца шеи; 9 - трахея; 10 - щитовидная железа; 11 - пищевод; 12 - фасциальная пластина, отделяющая передний отдел шеи от заднего; а-д – фасции

Основные слои включают кожу, подкожную жировую клетчатку, мышцы и другие структуры, имеющие значительное влияние на распределение электрического тока и, следовательно, на измеряемый импеданс. Данные о толщинах слоев до сонной артерии представлены в таблице 1. Они получены с помощью метода ультразвукового сканирования в рамках проведенного исследования, что позволило детально оценить их размеры и учесть их в дальнейших расчетах.

Моделирование проводилось в среде моделирования Comsol Multiphysics с помощью модуля AC/DC, который позволяет моделировать электрические поля и токи в средах за счет применения уравнения Максвелла (уравнения электромагнитного поля) [11]. Для переменного тока обычно применяется квазистатическое приближение, при котором волновые эффекты игнорируются, а уравнения Максвелла упрощаются для моделирования низкочастотных процессов. Далее будут описаны настройки программного обеспечения для математического моделирования импеданса тканей при различной частоте переменного тока.

Исследование проводилось на частотах 50 и 100 кГц, амплитуда переменного тока составляла 0,78 мА, материал электродов – сталь с высокой магнитной проницаемостью [11]. В качестве области шеи выступала трехмерная модель в программной среде Comsol. Модель имеет анатомические слои шеи (рисунок 2), которым присвоены параметры в соответствии с их физико-электрическими характеристиками. В расчетах учитывались следующие биологические ткани: кожа (эпидерма и дерма), подкожный жир, мышца, кость, стенка артерии и кровь. Трехмерная модель представлена на рисунке 3.

Таблица 1 – Толщины слоев шеи до сонной артерии

Слой	Расстояние по УЗ, мм
Эпидерма	1,1
Дерма	
Гиподерма	
Фасция (superficial cervical fascia)	
Мышца platizma	3
Фасция (superficial cervical fascia)	
Фасция (deep cervical fascia)	
Мышца грудино-ключично-сосцевидная	
Фасция (deep cervical fascia)	5,1
Фасция	
Лопаточно-подъязычная мышца	2,1
Фасция	
Сонное влагалище	2,3
Суммарное расстояние до сонной артерии	18

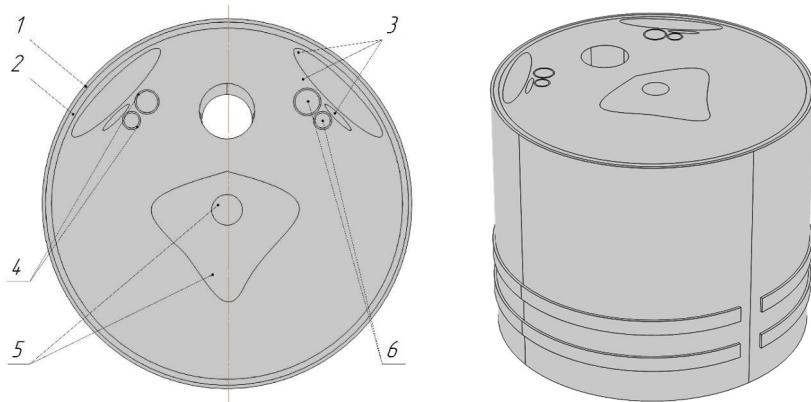


Рисунок 3 – Трехмерная модель среза шеи

1 – кожа (эпидерма, дерма), 2 – подкожный жир, 3 – мышца, 4 – стенка артерии, 5 – кость, 6 – кровь

Физико-электрические характеристики биологических тканей для частот 50 [12] и 100 кГц [13] приведены в таблице 2.

Таблица 2 Физические параметры анатомических слоёв

Анатомический слой	Физические параметры слоёв для переменного тока частотой			
	50 Гц		100 Гц	
	Удельная электрическая проводимость, См/м	Диэлектрическая проницаемость	Удельная электрическая проводимость, См/м	Диэлектрическая проницаемость
Эпидерма, дерма	0,029	21876	0,075	20000
Подкожная жировая клетчатка	0,025	172	0,02	90
Мышца	0,35	10094	0,51	21000
Стенка артерии	0,316	1633	0,313	1633
Кровь	0,7	5197	0,61	3300
Кость	0,021	280	0,0144	280

В процессе моделирования были приняты некоторые упрощения:

1) модель шеи представлена в форме цилиндра, ткани имеют изотропные свойства;

2) задняя часть шеи не разделена на отдельные мышечные сегменты, а рассматривалась как единая мышечная ткань;

3) в связи с индивидуальными размерами и расположением позвонка и трахеи, их геометрические параметры и положение на трехмерной модели выбраны в соответствии с анатомическим рисунком 2.

#### Методика проведения исследования

Для проведения исследований использовалось оборудование научно-образовательного центра «Инновационные технические решения в области медицины» на базе Орловского государственного университета имени И.С. Тургенева, приведенное в таблице 3.

Таблица 3 – Оборудование, участвующее в исследовании

Название	Характеристики/функции	Назначение
РЕО-СПЕКТР-2	 <p>Частота дискретизации: 500 Гц Частота переменного тока: 50; 100 кГц Сила тока: 0,77 мА Расстояние между электродами: 10 мм Биполярное отведение для измерения сигнала</p>	Измерение импеданса исследуемого участка за счет воздействия переменного тока

На рисунке 4, 5 представлены электроды и их крепление на теле человека.

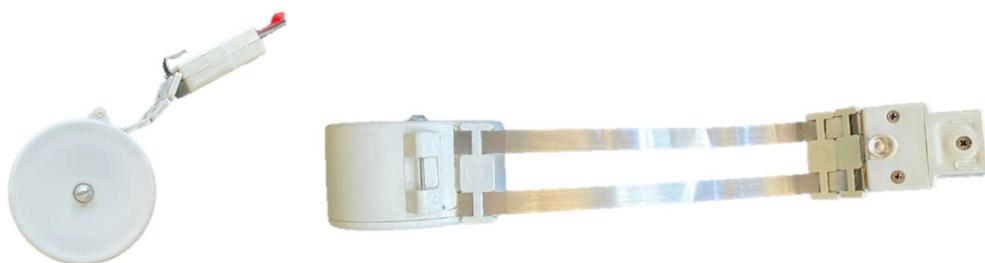


Рисунок 4 – Электроды для проведения исследования



Рисунок 5 – Крепление электродов в области шеи

Методика проведения исследования базировалась на следующих положениях.

1. Для измерения импеданса применялся электрод для регистрации реокардиографии по Кубичеку (рулетка «шейная») (рисунок 4), входящий в комплектацию прибора РЕО-Спектр, в области шеи ниже кадыка (рисунок 5).

2. Расстояние между электродами 10 мм.

3. В программе Рео-Спектр оценивался базовый измеренный импеданс, сопоставленный через градуировочную таблицу сопротивления, снятую на Рео-Спектре с помощью магазина сопротивлений Р33 класс 02.

4. Электрод крепился на шею человека (рисунок 5), затем в программе запускалась запись исследования, в которой отображалось значение импеданса и реограмма (рисунок 6).



*Рисунок 6 – Пример снятой реограммы и показания импеданса одного из участников исследования*

В исследовании приняли участие 11 условно здоровых мужчин в возрасте от 19 до 21 с диаметром шеи от 10 до 12 см.

### Результаты

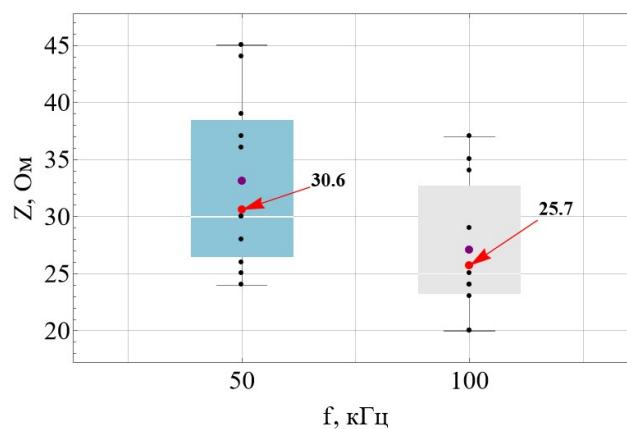
Значения импеданса, полученные в результате моделирования, и измеренные значения импеданса в соответствии с методикой проведения эксперимента приведены в таблице 4, а графическом формате на рисунке 7. Результаты статистической обработки полученных результатов представлены в таблице 5.

*Таблица 4 – Результаты исследования*

Частота тока	Значения импеданса, Ом											Расчетные значения	
	Экспериментальные значения для испытуемых												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
50 кГц	19	44	30	36	26	24	25	45	30	37	28	38,5	
100 кГц	17	35	23	29	24	20	20	37	25	27	24	29,3	

*Таблица 5 – Результаты статистической обработки экспериментальных данных*

Частота тока	Статистические характеристики значений импеданса, Ом					Расчетные значения импеданса, Ом
	Среднее значение	Средне-квадратическое отклонение	Медиана	Минимальное значение	Максимальное значение	
50 кГц	33	7,5	30	24	45	38,5
100 кГц	27	5,9	25	20	37	29,3



*Рисунок 7 – Результаты исследования*

Адекватность модели экспериментальным значениям проверяется с помощью t-критерия Стьюдента (формула 1) – статистического метода, который помогает проверить гипотезу о равенстве среднего значения выборки некоторому известному значению, и F-

критерия Фишера (формула 2). Формулы для проверки t-критерия Стьюдента и F-критерия Фишера представлены ниже [14], [15]:

$$t = \frac{\bar{Z}_{\text{exp}} - \bar{Z}_{\text{model}}}{\sqrt{\frac{\sigma^2}{n}}}; \quad (1)$$

где  $\bar{Z}_{\text{exp}}$  – среднее значение результатов исследования;

$\bar{Z}_{\text{model}}$  – значение результатов, полученных моделированием;

$\sigma^2$  – дисперсия выборки результатов исследования;

$n$  – количество данных в выборке.

$$\bar{F} = \frac{\sigma_A^2}{\sigma_{(Y)}^2}; \quad (2)$$

где  $\sigma_A^2 = \frac{1}{f} \cdot \sum_{i=1}^{i=N} (Z_{i\text{exp}} - Z_{\text{model}})^2$  – дисперсия адекватности;

$f$  – разность между числом различных опытов и числом параметров уравнений модели, в данном случае число свободных членов в уравнении Максвелла равно 2-м, представленными плотностью тока и плотностью заряда, а число опытов равно 11;

$\sigma_{(Y)}^2$  – дисперсия параметра оптимизации или средняя дисперсия воспроизводимости, равная  $56,29 \text{ Ом}^2$  для частоты  $50 \text{ кГц}$  и  $39,29 \text{ Ом}^2$  для частоты  $100 \text{ кГц}$  [15].

Подставляя в выражение (1) числовые значения величин для  $50$  и  $100 \text{ кГц}$ , получены значения  $t$ , равные, соответственно,  $1,1$  и  $0,77$ . Сравнивая полученные значения  $t$  с критическим значением, равным  $2,228$  для  $11$  измерений ( $1,1 < 2,228$  и  $0,77 < 2,228$ ), можно сделать вывод о том, что предложенная модель для  $50$  и  $100 \text{ кГц}$  является адекватной для уровня значимости  $0,05$  [14].

Подставляя в выражение (2) числовые значения величин, получено значение F-критерия Фишера  $5,03$  для частоты  $50 \text{ кГц}$  и  $8,48$  для частоты  $100 \text{ кГц}$ . Учитывая, что в сравнении принимает участие одна выборка, критическим значением является значение, соответствующее распределению хи-квадрат ( $\chi^2$ ), равное  $16,91$ . Найденные значения:  $5,03 < 16,91$  и  $8,48 < 16,91$  также подтверждают адекватность модели с уровнем значимости  $0,05$  для частот  $50$  и  $100 \text{ кГц}$  [14].

### Заключение

Стоит отметить, что встречаемые расхождения экспериментальных значений со значениями, полученными в результате моделирования, являются следствием не только допущенных упрощений, но и индивидуальными особенностями каждого организма, а также влиянием динамических внешних факторов, влияющих на организм. К таким факторам можно отнести температуру окружающей среды и индивидуальную способность переносить ее, что в процессе влияет на электропроводность тканей ввиду усиленного потовоизделения. Также на изменение импеданса может влиять варирование массы человека, влияние которой распространяется на толщину подкожного слоя.

С учетом вышеизложенного, можно сделать вывод о том, что, несмотря на допущенные упрощения модели и расхождения, полученные результаты исследования продемонстрировали адекватность модели по двум критериям с уровнем значимости  $5 \%$ .

Полученные результаты позволят в будущем исследовать с помощью предложенной модели процессы, протекающие в области шеи, более детально, например, глубину проникновения переменного тока в ткани в зависимости от частоты, что обеспечит лучшее понимание происходящих процессов применительно к объекту исследования и даст возможность осуществить оптимальный выбор зондирующей частоты током.

*Работа выполнена в ОГУ имени И.С. Тургенева в рамках государственного задания № 075-00196-24-02 на 2024 год и на плановый период 2025 и 2026 годов от 01.04.2024 г., проект № FSGN-2024-0007 (1023110800218-7-3.2.4;3.1.3;2.6.1).*

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Здравоохранение в России. 2023: Стат.сб./Росстат. - М., 2023. - 179 с.
2. Анализ предикторов эпилептических приступов / А. В. Жидков, А. А. Макаров, К. В. Подмастерьев, М. П. Жильцов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2020. – № 3. – С. 112-121.
3. А.В. Холин, Е.В. Бондарева. Допплерография и дуплексное сканирование сосудов. М.: МЕДпресс-информ, 2019. 96 с.
4. Digital Subtraction Angiography (DSA) Technical and Diagnostic Aspects in the Study of Lower Limb Arteries / Alessandro Posa, Alessandro Tanzilli, Pierluigi Barbieri [и др.] // Radiation: электронный журнал. – URL: <https://www.mdpi.com/2673-592X/2/4/28>. – Дата публикации: 1.11.2022.
5. Coronary Computed Tomographic Angiography for Complete Assessment of Coronary Artery Disease: JACC State-of-the-Art Review / Patrick W. Serruys, Hironori Hara, Garg Scot Garg [и др.] // JACC: электронный журнал. – URL: <https://www.jacc.org/doi/abs/10.1016/j.jacc.2021.06.019>. – Дата публикации: 10.08.2021.
6. Usefulness of Cardiac Magnetic Resonance Imaging in Aortic Stenosis / Yohann Bohbot, Cédric Renard, Alain Manrique [и др.] // AHAJASA: электронный журнал. – URL: <https://www.ahajournals.org/doi/full/10.1161/CIRCIMAGING.119.010356>. – Дата публикации: 06.05.2020. – ISSN 1942-0080.
7. Акопян В.Б., Ершов Ю.А. Ультразвук в медицине, ветеринарии и биологии: учебное пособие для среднего профессионального образования. 2-е изд. М.: Издательство Юрайт, 2020. 211 с.
8. Akay M. Wiley Encyclopedia of Biomedical Engineering. Wiley, 2006.
9. Методы и приборы функциональной диагностики: учебное пособие / С.В. Фролов, В.М. Строев, А.В. Горбунов, В.А. Трофимов. – Тамбов: ТГТУ, 2008. – 80 с. – ISBN 978-5-8265-0762-9.
10. Малая медицинская энциклопедия: В 6 т. /Гл. ред. В. И. Покровский. — М.: Сов. энцикл.: Большая Рос. энцикл.: Медицина, 1991—1996.
11. COMSOL Multiphysics. Руководство пользователя. — 2023. — Версия 6.1. — Стокгольм: COMSOL AB, 2023. — 1490 с.
12. The effect of vascular diseases on bioimpedance measurements: mathematical modeling / H. S. Yomna, A. Mohamed, T. E. Eldosoky, T. E. Mohamed // Biomedical Research and Therapy. – 2018. – Т. 5, № 6. – С. 2414-2431.
13. Bazaka, K. Implantable Devices: Issues and Challenges / K. Bazaka, V. Jacob Mohan // electronics: электронный журнал. – URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/2/1/1>. – Дата публикации: 21.12.2012.
14. Гланц, С. Медико-биологическая статистика / С. Гланц. – Москва: Практика, 1998. – 459 с. – ISBN 5-89816-009-4.
15. Петров, А. В. Моделирование процессов и систем: учебное пособие / А. В. Петров. — Санкт-Петербург: Лань, 2021. — 288 с. — ISBN 978-5-8114-1886-2. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/168879> (дата обращения: 07.09.2024).

**Жидков Алексей Владимирович**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл  
Кандидат технических наук, доцент кафедры  
приборостроения, метрологии и сертификации  
302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29  
E-mail: epipro@rambler.ru

**Денисов Дмитрий Витальевич**

ФГБОУ «ОГУ имени И. С. Тургенева», г. Орёл  
Студент кафедры приборостроения, метрологии и  
сертификации  
302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29  
E-mail: 4567426@mail.ru

**Подмастерьев Константин Валентинович**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл  
Доктор технических наук, профессор, директор  
института приборостроения, автоматизации и  
информационных технологий  
302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29  
E-mail: asms-orel@mail.ru

**Абдувосидов Хуршид Абдувохидович**

ФГБОУ ВО Российский биотехнологический  
университет (РОСБИОТЕХ), г. Москва  
Заведующий кафедрой морфологии человека  
медицинского института, доктор медицинских  
наук.  
125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 11  
E-mail: sogdiana99@gmail.com

---

ZHIDKOV A.V., PODMASTEREV K.V., DENISOV D.V., ABDUVOSIDOV H.A.

## **TISSUE IMPEDANCE STUDY AT DIFFERENT AC FREQUENCIES**

**Abstract.** A model of human neck impedance designed for the study of biophysical processes by electroplesmography is proposed. The results of theoretical and experimental studies of tissue impedance at frequencies of 50 and 100 kHz are presented. The methodology of the experiment, the equipment used and the obtained results confirming the adequacy of the proposed model in analyzing blood flow in the carotid artery are described.

**Keywords:** impedance of biological tissues, alternating current, impedance electroplesmography, impedance modeling, blood flow in the carotid artery, diagnosis of cardiovascular diseases, electrical resistance of tissues.

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Health care in Russia. 2023: Stat.sbs./Rosstat. - M., 2023. - 179 p.
2. Analysis of predictors of epileptic seizures / A. V. Zhidkov, A. A. Makarov, K. V. Podmasteriev, M. P. Zhiltsov // Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology. - 2020. - № 3. - p. 112-121.
3. A.V. Kholin, E.V. Bondareva. Dopplerography and duplex scanning of vessels. Moscow: MEDpress-Inform, 2019. 96 p.
4. Digital Subtraction Angiography (DSA) Technical and Diagnostic Aspects in the Study of Lower Limb Arteries / Alessandro Posa, Alessandro Tanzilli, Pierluigi Barbieri [et al] // Radiation: electronic journal. - URL: <https://www.mdpi.com/2673-592X/2/4/28>. - Date of publication: 1.11.2022.
5. Coronary Computed Tomographic Angiography for Complete Assessment of Coronary Artery Disease: JACC State-of-the-Art Review / Patrick W. Serruys, Hironori Hara, Garg Scot Garg [et al] // JACC: an electronic journal. - URL: <https://www.jacc.org/doi/abs/10.1016/j.jacc.2021.06.019>. - Date of publication: 10.08.2021.
6. Usefulness of Cardiac Magnetic Resonance Imaging in Aortic Stenosis / Yohann Bohbot, Cédric Renard, Alain Manrique [et al] // AHAJASA: electronic journal. - URL: <https://www.ahajournals.org/doi/full/10.1161/CIRCIMAGING.119.010356>. - Date of publication: 06.05.2020. - ISSN 1942-0080.
7. Akopyan V.B., Ershov Y.A. Ultrasound in medicine, veterinary medicine and biology: textbook for secondary vocational education. 2-e ed. M.: Yurait Publishing House, 2020. 211 p.
8. Akay M. Wiley Encyclopedia of Biomedical Engineering. Wiley, 2006.
9. Methods and devices of functional diagnostics: textbook / S.V. Frolov, V.M. Stroev, A.V. Gorbunov, V.A. Trofimov. - Tambov: TSTU, 2008. - 80 p. - ISBN 978-5-8265-0762-9.
10. Small Medical Encyclopedia: In 6 vol. /Head. ed. V. I. Pokrovsky. - Moscow: Sov. encyclopedia: Bolshaya Ros. encyclopedia: Medicine, 1991-1996.
11. COMSOL Multiphysics. User Manual. - 2023. - Version 6.1. - Stockholm: COMSOL AB, 2023. - 1490 p.
12. The effect of vascular diseases on bioimpedance measurements: mathematical modeling / H. S. Yomna, A. A. Mohamed, T. E. Eldosoky, T. E. Mohamed // Biomedical Research and Therapy. - 2018. - T. 5, № 6. - p. 2414-2431.
13. Bazaka, K. Implantable Devices: Issues and Challenges / K. Bazaka, V. Jacob Mohan // electronics: electronic journal. - URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/2/1/1>. - Date of publication: 21.12.2012.
14. Glantz, S. Medico-biological statistics / S. Glantz. - Moscow: Praktika, 1998. - 459 p. - ISBN 5-89816-009-4.
15. Petrov, A. V. Modeling of processes and systems: a textbook / A. V. Petrov. - St. Petersburg: Lan, 2021. - 288 c. - ISBN 978-5-8114-1886-2. - Text: electronic // Lan: electronic-library system. - URL: <https://e.lanbook.com/book/168879> (date of access: 07.09.2024).

**Zhidkov Aleksey Vladimirovich**

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Orel State University named after I.S. Turgenev»,  
Candidate of Technical Sciences, Department of Instrument Engineering, Metrology and Certification  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: epipro@rambler.ru

**Podmasteriev Konstantin Valentinovich**

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Orel State University named after I.S. Turgenev»,  
Doctor of Technical Sciences, director of the Institute of Instrument Engineering, Automation and Information Technologies  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: asms-orel@mail.ru

**Denisov Dmitry Vitalievich**

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Orel State University named after I.S. Turgenev»,  
Student of the Department of Instrument Engineering, Metrology and Certification  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: 4567426@mail.ru

**Abduvosidov Hursched Abduvohidovich**

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Russian Biotechnological University,  
Student of the Department of Instrument Engineering, Metrology and Certification  
125080, Moscow, Volokolamskoe shosse, 11  
E-mail: sogdiana99@gmail.com

# **КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА, ИСПЫТАНИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ**

УДК 621.3.066.6

DOI: 10.33979/2073-7408-2024-368-6-127-135

ФЕОКТИСТОВ Д.И., ВОРКУНОВ О.В., МАКЛЕЦОВ А.М.

## **ОСОБЕННОСТИ КОНТАКТНОГО МОНИТОРИНГА ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ**

**Аннотация.** В статье предложен способ непрерывного мониторинга температуры контактов электрооборудования напряжением 0,4 кВ. Создана система контроля температуры с беспроводной передачей измеренных значений на основе датчиков температуры DS18B20, прикрепленных на контактах электрооборудования и микроконтроллера ATmega328. Представлена блок схема алгоритма разработанного программного обеспечения созданной системы мониторинга температуры. Получено поле распределения температуры около контактного соединения, с выявлением наиболее сильных областей нагрева. Для вычисления погрешностей, вызванных определением наиболее удобного места крепления датчика, а также нанесением дополнительной изоляции, в месте его крепления, создана имитационная модель, описывающая процессы тепловодности материалов в месте контактного соединения. Вследствие проведенного моделирования, а также практической апробации, определено наиболее оптимальное место крепления датчика температуры с внесением погрешности измерения в программный алгоритм. Полученная методика может быть использована для создания систем непрерывного температурного мониторинга соединительных контактов на более высокое напряжение.

**Ключевые слова:** минеральное трансформаторное масло, высоковольтные разрядные процессы, тангенс угла диэлектрических потерь силикагель, адсорбционная очистка.

### **Введение**

Обеспечение надежной и безаварийной работы электроэнергетических сетей невозможно без мониторинга состояния электрооборудования. Согласно [1] одной из причин возникновения аварийных ситуаций в системах электроснабжения является перегрев контактных соединений (КС). Перегрев КС приводит либо к обрыву проводника, либо к возгоранию электрооборудования внутри закрытой трансформаторной подстанции, который может быть вызван различными факторами, такими как неправильный монтаж, ослабление контактного соединения, износ или коррозия контактных поверхностей [1, 2].

Процесс развития дефекта в КС протекает достаточно длительное время и зависит от ряда факторов, таких как ток нагрузки и его стабильность, условия окружающей среды, усилий затяжки болтов и др. Постепенное повышение переходного сопротивления КС происходит до определенного момента времени, после чего деградационные изменения переходят в лавинообразный отказ с интенсивным тепловыделением и впоследствии – полным повреждением соединения [3].

В настоящее время существуют различные методы и технологии мониторинга температуры контактов шин распределительных устройств закрытых трансформаторных подстанций, которые позволяют оперативно обнаруживать перегрев контактов и предотвращать возможные аварии. В большинстве своём данные системы являются достаточно сложны в производстве и эксплуатации. В подавляющем большинстве случаев контроль соединительных контактов осуществляется в ручном режиме с определенной периодичностью методом периодического тепловизионного контроля либо визуального контроля термоиндикаторных наклеек, что не позволяет вовремя обнаружить и устранить неисправный контакт, а также требует значительных временных затрат на обход контролируемых объектов и проведение измерений. К тому же, его нельзя назвать оптимальным, так как нагрев болтовых соединений зависит в основном от тока нагрузки, а при периодическом контроле нельзя быть уверенным, что в момент контроля ток через контролируемый элемент максимален.

Таким образом создание недорогой автоматизированной системы температурного мониторинга контактов электрооборудования, для предотвращения аварийных ситуаций и

для повышения надежности КС в частности и энергосистемы в целом является актуальной задачей.

### **Основная часть**

В настоящее время существует ряд подобных систем для контроля температуры, которые условно можно разделить на три большие группы, представленные в таблице 1. Это первичные преобразователи на основе поверхностно-акустических волн (ПАВ), пиromетрические датчики, а также системы на основе термогазовых (термоиндикаторных) индикаторов. Наиболее точными являются датчики ПАВ, но достаточно высокая стоимость не способствует их массовому внедрению. Системы на основе пиromетрических датчиков получили более широкое распространение, но также являются дорогим вариантом. Наиболее часто встречаются системы на основе термогазовых (термоиндикаторных) индикаторов. Их принцип действия основан на выделении газа при определенном пороге превышения температуры, который фиксируется специальным датчиком. Главным недостатком подобных систем является невозможность точной локализации перегрева определенного контактного соединения. Таким образом разработка новой, относительно недорогой системы измерения температуры контактов электрооборудования, удовлетворяющим оптимальным технико-экономическим показателям является актуальной задачей.

**Таблица 1 - Сравнительные характеристики систем мониторинга**

Физические параметры	ПАВ-датчики	Термогазовые индикаторы	Пиromетрические датчики
Ориентировочная стоимость (руб.)	60000	22000	49000
Метод измерения	Контактный	Контактный	Бесконтактный
Необходимость дополнительного питания	Нет	Да	Да
Погрешность измерения	$\pm 4^{\circ}\text{C}$	$\pm 5^{\circ}\text{C}$	$\pm 4^{\circ}\text{C}$
Диапазон температур	-40...+120	80...+130	-40...+120
Ограничение по количеству датчиков	Да	Нет	Нет
Электромагнитные помехи	Да	Нет	Нет
Высокое быстродействие	Нет	Нет	Да

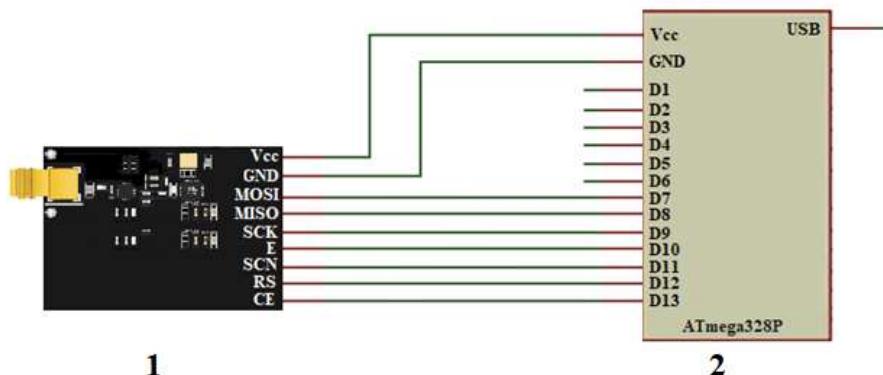
Предлагаемая авторами система мониторинга температурных параметров в первую очередь отличается от существующих наличием однопроводного канала для передачи данных, что позволяет существенно уменьшить количество проводов, упростить систему монтажа, что в конечном виде способствует уменьшению стоимости системы. В основе системы лежит микроконтроллер ATmega328, антенны беспроводной связи nRF24L01 и датчики температуры DS18B20.

Рабочее напряжение системы составляет 5В и может быть обеспечено от питания собственных нужд трансформаторной подстанции. Модуль приемо-передатчика NRF24L01 позволяет связать до семи приборов в общую радиосеть по топологии звезда (с одним главным приемником в центре) на частоте 2,4 ГГц. Это позволяет использовать один приемный модуль для одновременного контроля температуры нескольких подстанций. Для контроля температуры контактов в одной трансформаторной подстанции может быть размещено до 256 штук датчиков температуры DS18B20 [4]. При количестве датчиков до 12 штук питание может быть непосредственно от линии данных, без использования внешнего источника (данний параметр еще зависит от сопротивления и длины соединительных проводов). У каждого температурного преобразователя DS18B20 имеется свой уникальный серийный код длиной 64 разряда, который позволяет последовательно подключать несколько датчиков на один порт микроконтроллера. Несомненно, при большом количестве подключенных датчиков уменьшается время опроса каждого из них, но для рассматриваемой системы, это не критично,

т.к. мгновенных изменений температуры не происходит. Электрическая схема модуля для беспроводного приема измеренных значений температуры, для разработанной системы измерения контактов электрооборудования представлена на рисунке 1.

Как видно из рисунка 1 модуль состоит из 2 компонентов: модуля приемо-передатчика NRF24L01 для приема измеренных значений температуры (данний модуль может быть также использован для передачи сигналов) и микроконтроллера ATmega328. Микроконтроллер необходим для управления процессом приема и передачи сигналов и передачи их на компьютер через порт сопряжения USB. Специально написанная программа проводит анализ данных и представляет результат для пользователя в графическом и цифровом представлении. Интерфейс программы несложен и позволяет наблюдать за изменениями температуры для каждого контакта. В целях сокращения объема статьи назначение каждого порта микроконтроллера не приводится.

Блок схема программы для микроконтроллера ATmega328 приведена на рисунке 2. Рассмотрим ее подробнее. На первом этапе подключаются специальные библиотеки RF24.h для работы с передающей антенной и SPI.h для работы с ПК. Эти библиотеки являются свободно распространяемым программным продуктом [4]. Далее в программе происходит указание портов микроконтроллера для подключения к ПК, антенны модуля беспроводной передачи информации NRF24L01. После этого происходит: передача информации от микроконтроллера к ПК; от принимающей антенны связи к микроконтроллеру. Если связь не установилась, то происходит повторная проверка портов подключения. Если же связь установилась, то происходит выбор канала для передающей антенны связи, устанавливается уровень мощности, а так же скорость передачи данных. Это необходимо для того, чтобы передача информации происходила без помех.

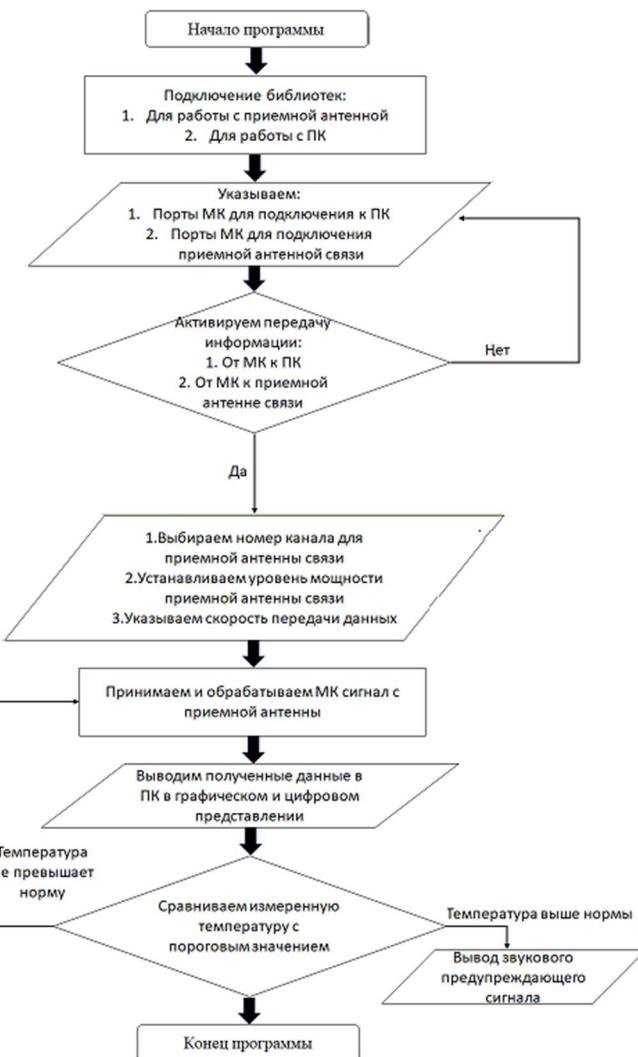


**Рисунок 1 - Электрическая схема беспроводного приемного модуля:**  
1 – Модуль приемо-передатчика NRF24L01; 2 – Микроконтроллер ATmega328.

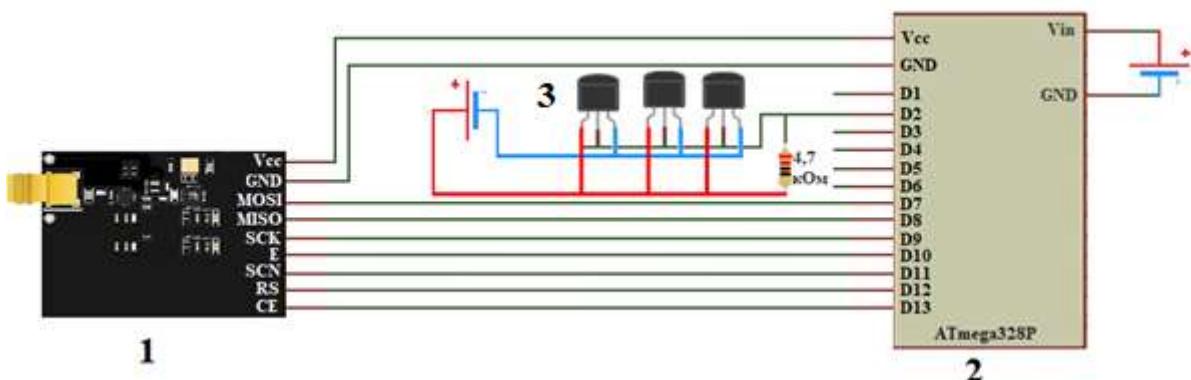
Далее происходит прием и обработка сигнала, полученного от передающего модуля с помощью принимающей антенны. Выводим полученные данные на ПК в графическом и цифровом представлении. Далее происходит сравнение полученной измеренной температуры с пороговым значением. Если температура не превышает норму, то запрашиваем новое измеренное значение и повторяем цикл с выводом данных на ПК и сравнении полученной измеренной температуры с пороговым значением. Если при сравнении оказывается, что измеренная температура выше порогового значения, выводится звуковой предупреждающий сигнал о превышении температуры нагрева контакта и программа отображает номер датчика, по которому можно определить его местонахождение.

Электрическая схема приемного модуля разработанной системы измерения температуры контактов электрооборудования представлена на рисунке 3. Модуль для измерения температуры состоит из 3 компонентов: модуля приемо-передатчика NRF24L01 для передачи измеренных значений температуры, микроконтроллера ATmega328 и нескольких датчиков температуры DS18B20. Микроконтроллер необходим для проведения опроса измеренных показаний температуры, а также для передачи информации на модуль

беспроводной передачи NRF24L01. В целях сокращения объема статьи назначение каждого порта микроконтроллера не приводится.



*Рисунок 2 - Блок-схема программы для приема измеренных значений температуры*



*Рисунок 3 - Схема модуля измерения температуры с беспроводной передачей информации:*

1 – Модуль приемо-передатчика NRF24L01; 2 – Микроконтроллер ATmega328; 3 – Датчики температуры DS18B20.

Блок схема написанной программы для микроконтроллера ATmega328 приведена на рисунке 4. Рассмотрим ее подробнее. На первом этапе подключаются библиотеки RF24.h для работы с передающей антенной и microDS18B20.h для работы с датчиком температуры. Данные библиотеки свободно распространяются фирмой производителем датчиков Dallas Semiconductor, для облегчения синхронизации датчиков температуры с различными устройствами [4].

Далее в программе происходит указание портов микроконтроллера для подключения датчиков температуры, а также портов для подключения антенны связи. После этого происходит активация передачи информации от датчика температуры к микроконтроллеру, и от микроконтроллера к передающей антенне связи. Если связь не установилась, то происходит повторная проверка портов. Если связь установилась, происходит выбор канала для передающей антенны связи, устанавливается уровень мощности, а также скорость передачи данных. Далее происходит обработка полученного сигнала с датчика температуры.

Для проведения корректных измерений необходимо осуществить выбор места крепления датчика температуры. Для этого необходимо учитывать следующие факторы: датчик должен быть установлен таким образом, чтобы он мог точно измерять температуру контакта, не подвергаясь влиянию окружающей среды; место установки должно быть легко доступным для обслуживания и замены датчика; место установки должно обеспечивать безопасность персонала, работающего с электроустановкой [5, 6].

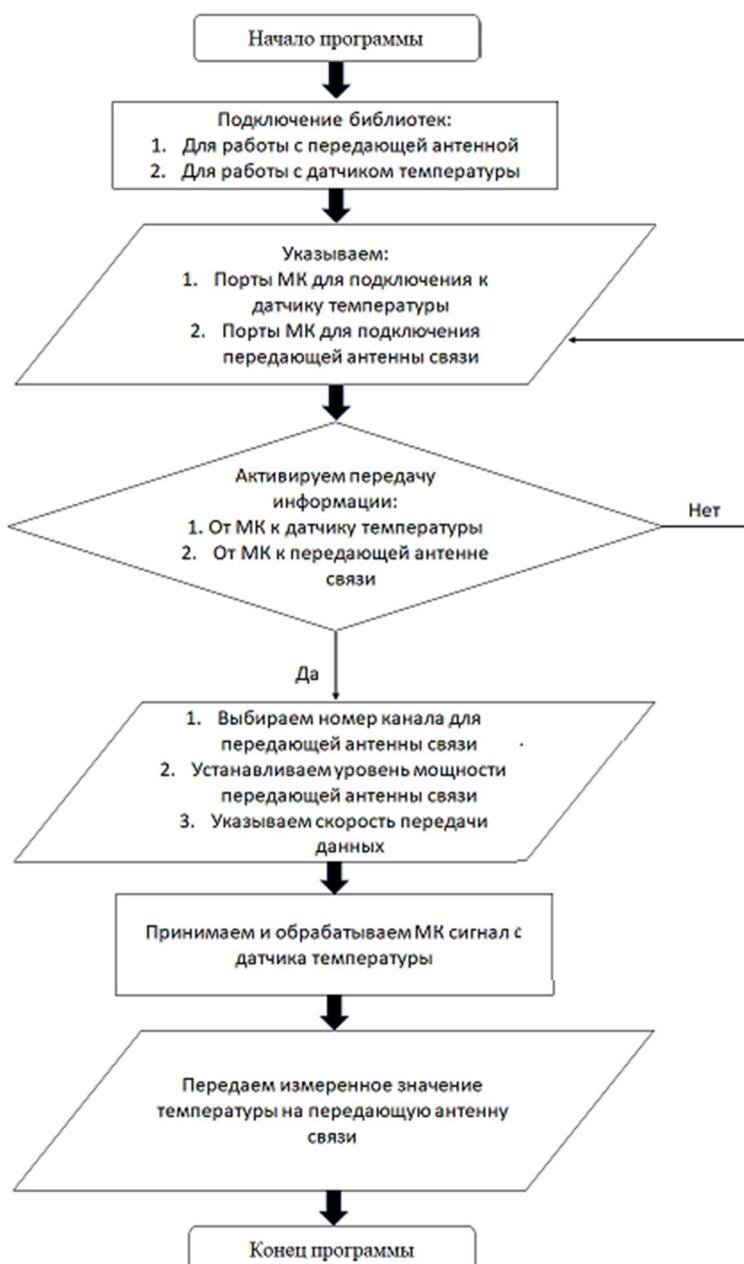
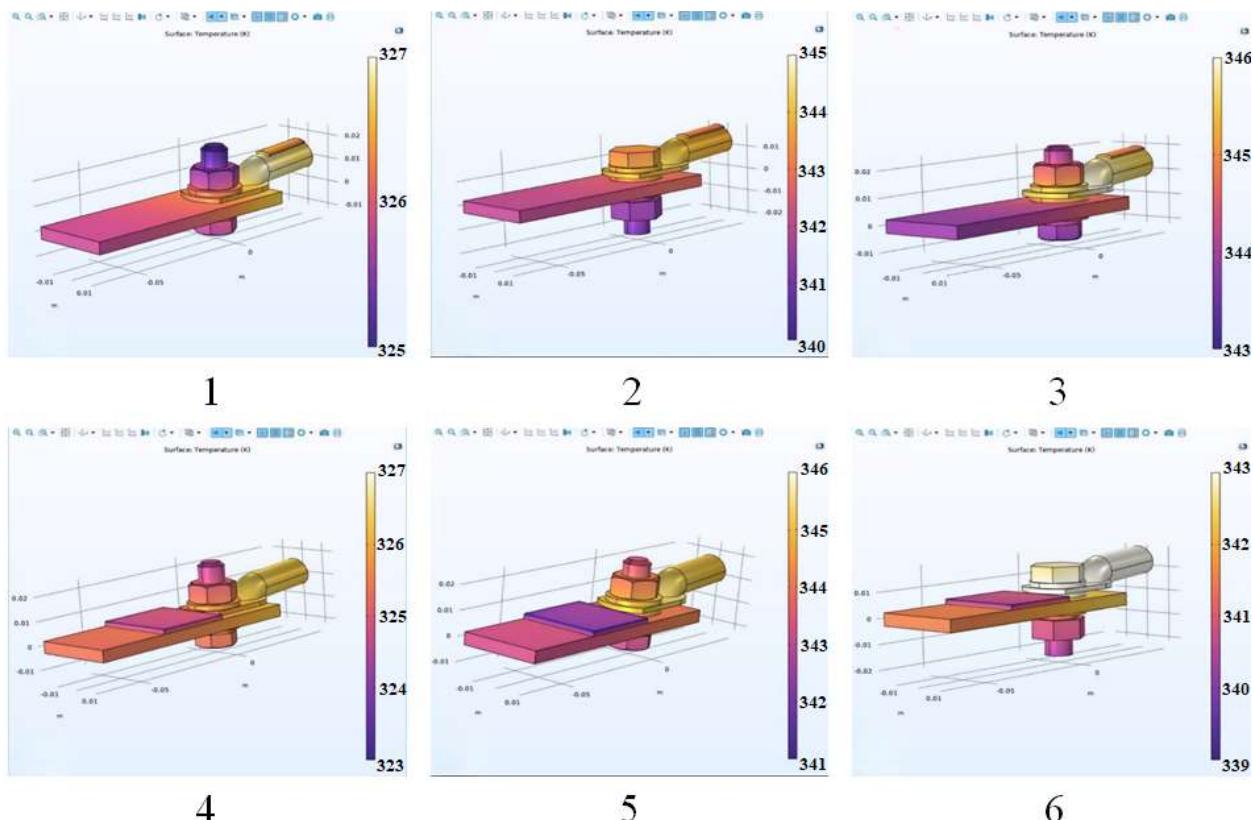


Рисунок 4 - Блок-схема программы для передачи измеренных значений температуры

Согласно проведенным экспериментальным исследованиям с помощью тепловизора, было выявлено, что наибольшая температура нагрева возникает в болтовом месте соединения.

Это место неудобно для крепления датчика и установить его на болт или гайку является затруднительно, т.к. при этом сложно обеспечить хороший контакт выпускаемого производителем датчика DS18B20 (без специальных доработок) с объектом измерения [7]. Любая доработка возможна, но она приведет к неизбежному удорожанию разработанной системы. В связи с этим целесообразно рассмотреть другой вариант крепления, который бы не повлек за собой изменение стандартной формы рассматриваемого датчика. Для этого авторами был рассмотрен способ установки датчика температуры в месте непосредственной близости к болтовому соединению, например на секции шинопровода или на кабельный наконечник, которые располагаются рядом с местом соединения. При этом, зная физические свойства материалов: болт, гайка, шайба, шинопровод, кабельный наконечник, в частности их теплопроводность, можно с помощью специальных программных средств рассчитать изменение температуры по мере удаления от наиболее нагретой точки [8]. Определив значение температуры на определенном расстоянии от которой (например шинопровод, на удалении 5 см от болтового соединения) и внеся коррекцию в программный код, можно с небольшой погрешностью определить текущую температуру наиболее нагретой точки (болтового соединения).

Для определения поля распределения температуры контактных соединений, включающих в себя шину из меди, закрепляющего болта и шайбы из титана, кабельного наконечника с резиновой накладкой (толщиной 2 мм) было построено несколько имитационных моделей контактных соединений с разными местами установки датчика температуры DS18B20 (рисунок 5). Резиновая накладка необходима для изоляции датчика температуры от прямого контакта с токопроводящими элементами. Выбранная толщина подходит для изоляции напряжения величиной 10 кВ. В моделях № 1, 4 место имитация места соединения без шайбы, № 2, 3, 5, 6 с шайбами.



*Рисунок 5 - Модели контактных соединений с разным местом крепления датчика и распределением температуры:*

1,2,3 – с установленной накладкой на кабельном наконечнике, 4,5,6 – с установленной накладкой на секции шин

Как видно из анализа построенных моделей температура наиболее важных точек (наиболее нагретая точка и резиновая накладка, т.е. место крепления датчика) при пропускании электрического тока  $I = 40 \text{ A}$ , напряжением  $0,4 \text{ кВ}$  составляет:

Модель 1: Температура кабельного наконечника составляет  $326,9 \text{ К}$  ( $53,75 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ); резиновой накладки –  $326,5 \text{ К}$  ( $53,35 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Модель 2: Температура кабельного наконечника составляет  $345 \text{ К}$  ( $71,85 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ); резиновой накладки –  $343,6 \text{ К}$  ( $70,45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Модель 3: Температура кабельного наконечника составляет  $346,2 \text{ К}$  ( $73,05 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ); резиновой накладки –  $345,2 \text{ К}$  ( $72,05 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

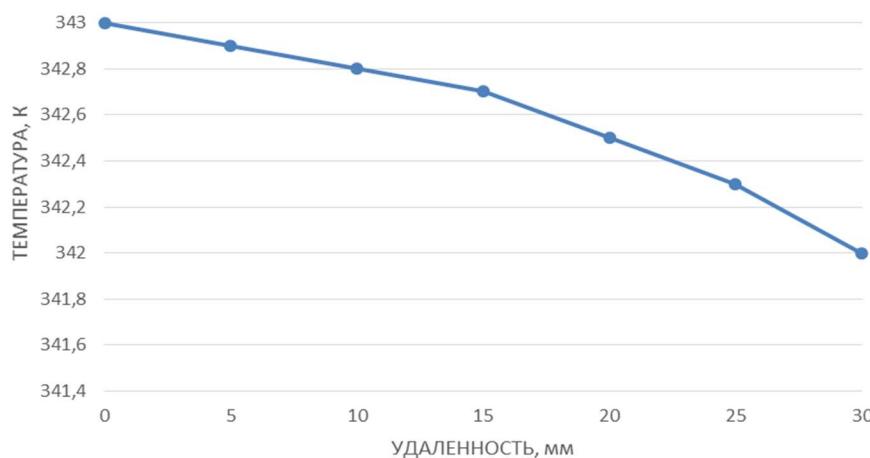
Модель 4: Температура кабельного наконечника составляет  $346,9 \text{ К}$  ( $73,75 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ); резиновой накладки –  $(69,85 \text{ }^{\circ}\text{C})$ .

Модель 5: Температура кабельного наконечника составляет  $327 \text{ К}$  ( $53,85 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ); резиновой накладки –  $325 \text{ К}$  ( $51,85 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Модель 6: Температура кабельного наконечника составляет  $343,5 \text{ К}$  ( $70,35 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ); резиновой накладки –  $341 \text{ К}$  ( $67,85 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Как видно из моделей 1-6 наибольший нагрев наблюдается на местах соединения наконечника с шиной и в месте опрессовки наконечника, что в принципе подтверждает мнение о том, что крепить датчик необходимо в самой нагретой точке контактного соединения. При монтаже контактного соединения болтом вверх наблюдался меньший нагрев участка, по сравнению с соединениями, установленные болтом вниз.

Однако в силу конструктивных особенностей бывает достаточно сложно закрепить датчик на болтовом соединении, а при плохом контакте температурного датчика с последним, величина погрешности будет чрезвычайно высока [9]. Проведенные исследования показывают, что, зная материал шины, площадь ее поперечного сечения, вид изоляции контактного соединения датчика температуры, возможно допустить некоторую удаленность, при этом внеся в программный код поправку на погрешность измерения, полученную с помощью имитационной модели [10]. На рисунке 6 представлено изменение температуры нагрева шинопровода с резиновой подложкой в зависимости от расстояния до контактного соединения.



*Рисунок 6 - Изменение температуры нагрева подложки в зависимости от расстояния до контактного соединения*

Так же стоит отметить, что, судя по полученной зависимости из моделей, температура по мере удаления от болтового соединения сначала не сильно уменьшается, но с увеличением расстояния её снижение происходит быстрее.

### Заключение

1. В процессе исследований создан прототип устройства мониторинга контактных соединений, который был опробован на контактных соединениях в распределительных устройствах напряжением  $0,4 \text{ кВ}$ . Можно считать, что данное решение является

перспективным направлением в плане повышения надежности энергосистем и позволяет перейти на новый уровень качества их обслуживания.

2. Для разработанного устройства было написано уникальное программное обеспечение, которое позволяет производить постоянный мониторинг нагрева контактных соединений в энергосистеме и принимать необходимые корректирующие решения. Разработанная технология дает возможность оперативного реагирования на перегревы ещё до развития дефекта или возгорания в трансформаторных подстанциях, которые впоследствии могут привести к выходу оборудования из строя, аварийному отключению или гибели людей.

3. Для корректировки погрешностей измерения температуры было проведено моделирование, которое позволило получить зависимость температуры нагрева подложки от расстояния до контактного соединения.

На основе данной разработки, за счет корректировки программного обеспечения, может быть построена система раннего прогнозирования дефектов контактных соединений, что многократно повысит надежность сетей электроснабжения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пожары и пожарная безопасность в 2020 году: Статистический сборник / П.В. Полехин, М.А. Чебуханов, А.А. Козлов, А.Г. Фирсов, В.И. Сибирко, В.С. Гончаренко, Т.А. Чечетина. - М.: ВНИИПО, 2021. - 112 с.
2. S. Hall, B.Everts. Fire Loss in the United States During. Quincy, MA: NFPA, 2020. 2021, pp. 1-11.
3. Файбисович Д.Л. Справочник по проектированию электрических сетей. 2-е изд. М.: ЭНАС, 2007. 352 с.
4. Официальный сайт Норвежской компании Nordic Semiconductors. URL: <https://www.nordicsemi.com/>
5. Оптоволоконный датчик измерения температуры контактных соединений в электроустановках. Феоктистов Д.И., Воркунов О.В. Диспетчеризация и управление в электроэнергетике. Материалы Международной молодежной научно-практической конференции, посвященной 55-летию КГЭУ. Казань, 2024. С. 194-197.
6. Каликасов Н. Т. Моделирование температурного режима, мониторинг и прогнозирование перегрева болтовых контактных соединений токоведущих шин / Н. Т. Каликасов, Е. А. Сарсенбаев // Электричество. – 2021. – № 8. – С. 56-63.
7. ГОСТ 8024-90. Нормы нагрева при продолжительном режиме работы и методы испытаний.
8. Тахавутдинов, Р. Г. Компьютерная измерительная система распределенного контроля тепловых потерь / Р. Г. Тахавутдинов, О. В. Воркунов // Современные наукоемкие технологии. – 2005. – № 3. – С. 66-67.
9. Корчагин Д.А. К вопросу о применении системы непрерывного контроля состояния электрооборудования на подстанции // Вестник магистратуры. - 2017. - № 11-2 (74). – С. 11-13.
10. Феоктистов, Д. И. Температурный мониторинг соединительных контактов коммутационных аппаратов / Д. И. Феоктистов, О. В. Воркунов // Электрические сети: надежность, безопасность, энергосбережение и экономические аспекты: Материалы III Международной научно-практической конференции. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2023. – С. 247-252.

**Феоктистов Дмитрий Игоревич**  
ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань  
аспирант, кафедры «Электроэнергетические системы и сети»  
420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51  
Тел. 8(843) 519-42-72  
E-mail: feoktistovdi@bk.ru

**Воркунов Олег Владимирович**  
ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетические системы и сети»  
420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51  
Тел. 8(843) 519-42-72  
E-mail: vorcunov\_oleg@mail.ru

**Маклецов Александр Михайлович**  
ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетические системы и сети»  
420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51  
Тел. 8(843) 519-42-72  
E-mail: mac.am@mail.ru

---

FEOKTISTOV D.I., VORKUNOV O.V., MAKLETSOV A.M.

## FEATURES OF CONTACT MONITORING OF ELECTRICAL EQUIPMENT TEMPERATURE

**Abstract.** The article proposes a method for continuous monitoring of the temperature of contacts of electrical equipment with a voltage of 0.4 kV. A temperature control system with wireless transmission of measured values has been created based on DS18B20 temperature sensors attached to the contacts of electrical equipment and the ATmega328

*microcontroller. A block diagram of the algorithm of the developed software for the created temperature monitoring system is presented. The temperature distribution field near the contact joint was obtained, identifying the strongest heating areas. To calculate the errors caused by determining the most convenient location for attaching the sensor, as well as applying additional insulation at the place of its attachment, a simulation model was created to describe the processes of thermal water of materials at the point of contact connection. As a result of the modeling carried out, as well as practical testing, the most optimal location for mounting the temperature sensor was determined with the introduction of measurement error into the software algorithm. The resulting technique can be used to create systems for continuous temperature monitoring of connecting contacts at higher voltages.*

**Keywords.** temperature control, monitoring, temperature field, busbar, electrical equipment contacts.

## BIBLIOGRAPHY

1. Fires and fire safety in 2020: Statistical digest / P. V. Polekhin, M. A. Chebukhanov, A. A. Kozlov, A. G. Firsov, V. I. Sibirko, V. S. Goncharenko, T. A. Chechetina. - M.: VNIIPO, 2021. - 112 p.
2. S. Hall, B. Evarts. Fire Loss in the United States During. Quincy, MA: NFPA, 2020. 2021, pp. 1-11.
3. Faibisovich D. L. Handbook of electrical network design. 2nd ed. M.: ENAS, 2007. 352 p.
4. Official website of the Norwegian company Nordic Semiconductors. URL: <https://www.nordicsemi.com/>
5. Fiber optic sensor for measuring the temperature of contact connections in electrical installations. Feoktistov D.I., Vorkunov O.V. Dispatching and control in the electric power industry. Proceedings of the International youth scientific and practical conference dedicated to the 55th anniversary of KSPEU. Kazan, 2024. Pp. 194-197.
6. Kalikasov N.T. Modeling of temperature conditions, monitoring and forecasting of overheating of bolted contact connections of busbars / N.T. Kalikasov, E.A. Sarsenbaev // Electricity. - 2021. - No. 8. - Pp. 56-63.
7. GOST 8024-90. Heating standards for continuous operation and test methods.
8. Takhavutdinov, R. G. Computerized measuring system for distributed control of heat losses / R. G. Takhavutdinov, O. V. Vorkunov // Modern science-intensive technologies. - 2005. - No. 3. - P. 66-67.
9. Korchagin D. A. On the issue of using a continuous monitoring system for the state of electrical equipment at a substation // Bulletin of the Magistracy. - 2017. - No. 11-2 (74). - P. 11-13.
10. Feoktistov, D. I. Temperature monitoring of connecting contacts of switching devices / D. I. Feoktistov, O. V. Vorkunov // Electrical networks: reliability, safety, energy saving and economic aspects: Proceedings of the III International scientific and practical conference. – Kazan: Kazan State Power Engineering University, 2023. – P. 247-252.

**Feoktistov Dmitriy Igorevich**

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.  
Postgraduate student, Department of Electrical Power Systems and Networks  
51 Krasnoselskaya St., Kazan, Republic of Tatarstan, 420066, Kazan, Russia  
Tel. 8(843) 519-42-72  
E-mail: feoktistovdi@bk.ru

**Vorkunov Oleg Vladimirovich**

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.  
Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor of the Department of "Electric Power Systems and Networks".  
51 Krasnoselskaya St., Kazan, Republic of Tatarstan, 420066.  
Tel. 8(843) 519-42-72  
E-mail: vorcunov\_oleg@mail.ru

**Makletsov Alexander Mikhailovich**

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.  
Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor of the Department of "Electric Power Systems and Networks".  
51 Krasnoselskaya St., Kazan, Republic of Tatarstan, 420066.  
Tel. 8(843) 519-42-72  
E-mail: mac.am@mail.ru

© Феоктистов Д.И., Воркунов О.В., Маклецов А.М., 2024

**МАТЕРИАЛЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ**  
**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**  
**«ДИНАМИКА, НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ**  
**МЕХАНИЧЕСКИХ И БИОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ»**

УДК 620.3: 669.213.1

DOI: 10.33979/2073-7408-2024-368-6-136-140

ЛУКИНА Л.И., КОВАЛЕВ Н.И.

**НАНОБИОТЕХНОЛОГИЯ КАК ОДИН ИЗ ПЕРСПЕКТИВНЫХ  
МЕТОДОВ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ТОНКОДИСПЕРСНОГО ЗОЛОТА**

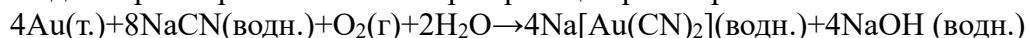
**Аннотация.** Вследствие наличия тонковкрапленных наноразмерных частиц золота в сульфидных, арсенопиритных рудах применение традиционной технологии обогащения золотосодержащих упорных руд малоэффективно. Поэтому проблема разработки и внедрения в золотодобывающую промышленность эффективной экологически безопасной нанобиотехнологии извлечения субмикроскопического золота из упорных руд с помощью металлофильных микроорганизмов является весьма актуальной. Показана избирательность выделенных из природных руд индивидуальных месторождений штаммов микроорганизмов, способных селективно аккумулировать мелкодисперсное золото.

**Ключевые слова:** нанобиотехнология, упорные руды, тонкодисперсное золото, биофлотация, штаммы микроорганизмов.

**Введение**

Сорок лет назад было открыто явление избирательной гетерокоагуляции минеральных коллоидных частиц с микроорганизмами [1]. На основе этого открытия получены фундаментальные и прикладные результаты, которые впоследствии легли в основу новейших научных направлений: биоколлоидной химии, биогеохимии, коллоидных биотехнологий, а в их рамках - биосинтеза наноразмерных частиц металлов и их соединений, нанофармации, наномедицины и нововетеринарии [2]. Одним из активно развивающихся направлений является нанобиотехнология извлечения тонкодисперсного золота из упорных (труднообогатимых) руд.

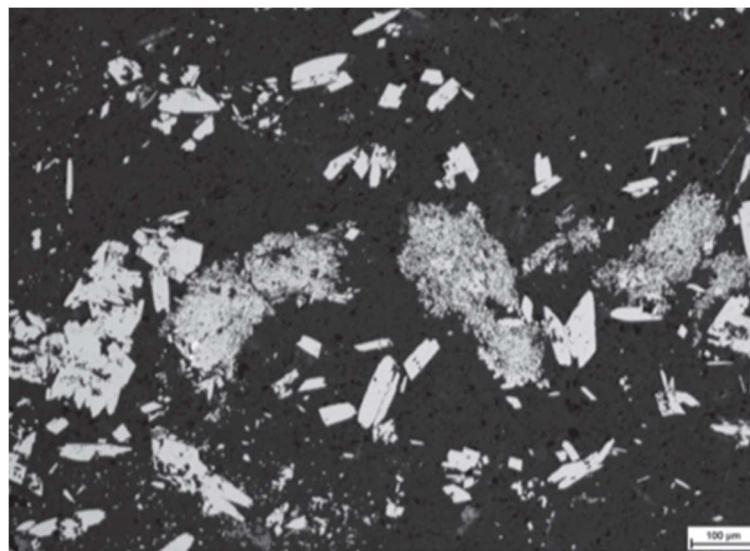
Металлургия золота, являющегося одним из стратегических видов сырья, основана на цианидном методе. Цианирование золота - это гидрометаллургический метод извлечения Au из окисленных и слабосульфидных руд путем перевода золота в водорастворимый комплекс с помощью цианида натрия. Уравнение Эльснера - реакция растворения Au:



Несмотря на токсичность исходного реагента современная металлургия золота основана на цианидном методе его извлечения из руд, который успешно применяется в мировой практике более 120 лет, обеспечивая получение 80-90 % металла из руд коренных месторождений. Однако легкообогатимые, к которым относятся окисленные и слабосульфидные золотосодержащие руды истощаются. До 30-40% мировых запасов золота содержится в пиритных и арсенопиритных рудах, являющихся упорными рудами, не поддающимися обычным методам переработки. Золото в них находится в виде тонких вкраплений в сульфидах. Использование традиционных технологий для переработки таких руд малоэффективно При обогащении таких руд методами флотации и гравитации потери золота составляют до 60-85% [3]. Установлено, что при использовании классических схем обогащения золотоносных руд, имеющих в своем составе тонкодисперсное золото существует определенный предел размерности: микрочастицы золота с размером частиц <70 мкм теряются в процессе переработки.

По данным [4, 5] процентное содержание в упорных рудах тонкодисперсного золота от 70 мкм до 10 нм может колебаться от следовых до 80% запасов. В некоторых промышленных объектах США до 85% запасов представлено частицами 0,2–0,0005 мкм (0,2 мкм до 0,05 нм). С конца прошлого века до настоящего времени в России средняя крупность золота в россыпях

уменьшилась в 2,5-3 раза, что привело к увеличению доли мелкодисперсного золота до 40%, а в отдельных россыпях – до 94% [6,7]. Для наглядности на рисунке 1 приведена микрофотография образца арсенопиритной руды Воронцовского месторождения, Северный Урал с включениями микрокристаллов золота [8].



*Рисунок 1 – Микрофотография образца арсенопирита с включениями тонкодисперсного самородного золота*

Вследствие этого возникает необходимость разрабатывать новые, более эффективные методы извлечения золота, которые могут быть применены к ультрадисперсным частицам.

Адекватным техническим ответом на истощение минерального сырья явились разработки методов бактериального выщелачивания и биофлотации, в которых основными элементами являются клетки штаммов металлофильных микроорганизмов, позволяющие вскрывать и селективно аккумулировать (флокулировать) ультрадисперсные частицы золота. Авторами [9, 10] показано, что нижнего предельного размера золотых частиц по дисперсности при биофлотации практически не существует. Процессы биосорбции и биoadгезии на клетках позволяют аккумулировать на их поверхности металлы в пределах от ионного и ультрадисперсного состояния до десятков микрометров.

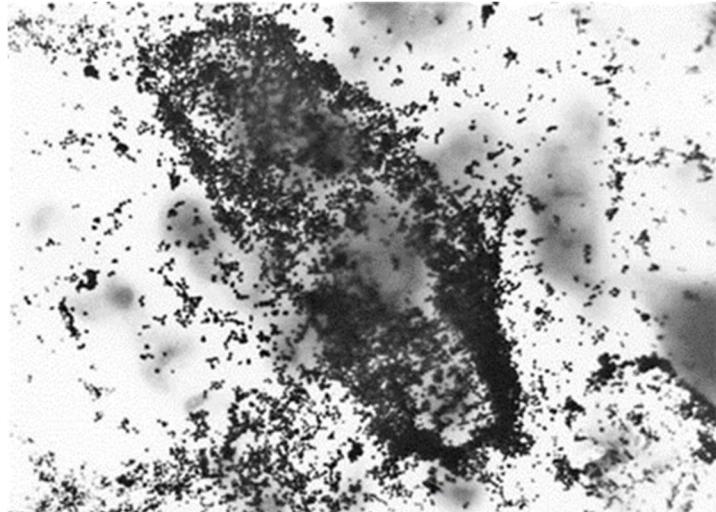
Особенностью биофлотации при извлечении тонкодисперсного золота является избирательность штаммов микроорганизмов, которые выделяют из природных руд индивидуальных месторождений.

### Основная часть

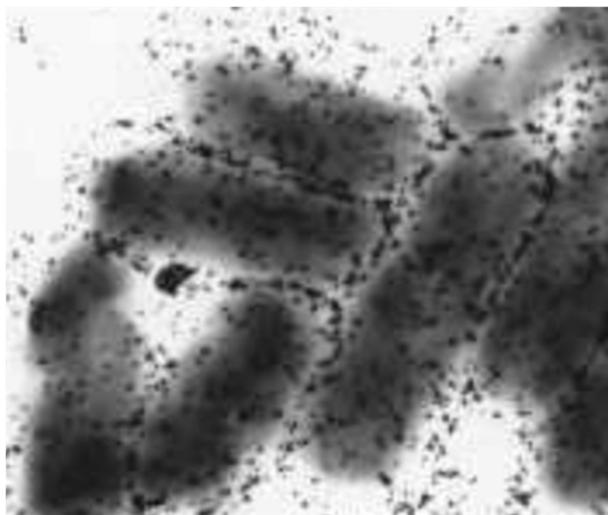
В данной работе приводятся экспериментальные данные по взаимодействию микроорганизмов, выделенных из золотоносной руды одного из месторождений Кыргызстана с колloidными частицами золота в модельных экспериментах. Из руды под условным названием КТ, относящейся к первичным пиритным золотосодержащим рудам, в которой около 30% золота находится в коллоидно-дисперсном состоянии, выделялись бактериальные культуры по методу Дригалльского [11]. Выделенные микроорганизмы помещались на мясопептонный агар и инкубировались при 30<sup>0</sup>С в течение 24-48 часов. В выросших колониях при изучении морфолого-физиологических свойств был обнаружен широкий спектр колоний микроорганизмов, отличающихся по размеру, цвету, форме, консистенции. Из каждой колонии неоднократным пассированием получали относительно чистые клетки. Выделенные культуры проверяли на способность взаимодействовать с коллоидным золотом, приготовленным по методике [12].

Полученные результаты свидетельствуют о том, что выделенные микроорганизмы значительно отличаются по способности к гетерокоагуляции с частицами тонкодисперсного золота. Часть бактериальных клеток проявляла высокую активность по отношению к коллоидному золоту. На рисунках 2, 3 приведены электронно-микроскопические фотографии

таких клеток и их ассоциатов, активно агрегирующих с частицами золота. Сорбция наночастиц золота происходила как непосредственно поверхностью клеток, так и в межклеточных пространствах, в которых сосредоточены продукты метаболизма. Это свидетельствует о том, что выделенные бактерии обладают свойством аккумулировать тонкодисперсное золото как моноклеткой, так и ассоциатами или флокулами клеток.



*Рисунок 2 – Сорбция коллоидного золота бактериальной клеткой, выделенной из руды КТ  
(увеличение х30000)*



*Рисунок 3 – Сорбция коллоидного золота ассоциацией бактериальных клеток, выделенных из руды КТ  
(увеличение х10000)*

Наличие активных металлофильных микроорганизмов в золотоносной руде КТ является свидетельством того, что при его формировании определенную роль играли коллоидно-биохимические процессы.

Часть выделенных клеточных культур проявляла слабо выраженное взаимодействие с тонкодисперсным золотом. Обнаружены также совершенно индифферентные к частицам золота клеточные культуры (рисунок 4).

Таким образом, полученные данные подтверждают возможность биофлотационного способа дополнительного извлечения мелкодисперсного золота

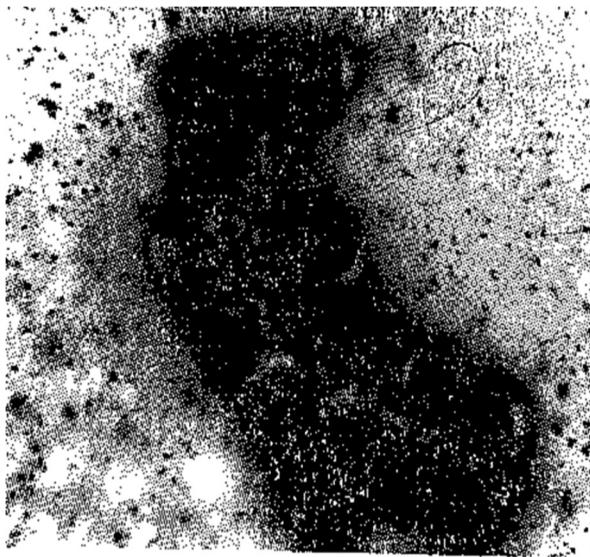
### **Заключение**

Из литературных источников следует, что с помощью коллоидных биохимических, биогеохимических исследований и биотехнологических методов установлена реальная

возможность извлекать тонкодисперсное золото из упорных руд. Эти исследования легли в основу нанобиотехнологии извлечения золота.

В золотоносной руде КТ установлено наличие активных металлофильных микроорганизмов, что подтверждает возможность биофлотационного способа дополнительного извлечения мелкодисперсного золота, не поддающегося обычной флотации.

Полученные данные подтверждают избирательность выделенных из природных руд индивидуальных месторождений штаммов микроорганизмов, среди которых имеются способные к селективной биофлотации тонкодисперсного золота.



**Рисунок 4 – Клеточные культуры, индифферентные к частицам золота  
(увеличение x30000)**

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Овчаренко Ф. Д., Перцов Н. В., Ульберг З. Р., Коган Б. С., Эстрела-Льопис В. Р., Явление избирательной гетерокоагуляции минеральных коллоидных частиц к микроорганизмам. Диплом на открытие № 361; гос. регистрация 20.12.1990.
2. Прокопенко В.А., Ковзун И.Г., Ульберг З.Р. Созидательный потенциал научного открытия // Вісник Національної академії наук України. - 2014. - № 10. - С. 52-61.
3. Колмогорцев Б.В., Вареничев А.А. Проблемы переработки бедных и упорных золотосодержащих руд //Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016, – №2. С. – 204-218
4. Kevin A. Foo, Murray D. Bath, Ismay A., and John H. Canterford, Proc. Of JointIntl Meeting Between SME and Aus IMW Gold Forum Technology and Practice—World Gold-89 (Reno–Littleton, CO, Nov. 5–8, 1989), p. 233.
5. Кармазин. В.В. Повышение извлечения мелкого и тонкого золота - основа золотодобычи в России в ближайшем будущем // Золотодобывающая промышленность. – №6 (36). 2009. – С. 29-33
6. Пискунова Н., Камашев Д. Познание глубин минерального наномира // Вестник Института геологии Коми ДВО РАН. 2009. – №6. – С. 1-6.
7. Санакулов К.С., Эргашев У.А., Гафуров К.У. Фактор флотационного эффекта при бактериальном окислении сульфидных золотосодержащих минералов // Горный вестник Узбекистана. – Навои, 2017. – №2. – С. 144-148.
8. Ковалчук Е.В., Тагиров Б.Р., Викентьев И.Р. и др. “Невидимое” золото в синтетических и природных кристаллах арсенопирита (Воронцовское месторождение, Северный Урал) // Геология рудных месторождений. - Том 61, № 5 – 2019. – С. 62-83.
9. Ульберг З.Р., Ващенко А.А. Биоколлоидная химия, биофлотационное извлечениеnano- и коллоидного золота из растворов и минеральных дисперсий // Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології. Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies. – 2008, т. 6, № 2, – С. 331–351
10. Ульберг З.Р., Грузина Т. Г., Духин А. С. Коллоидно-биохимический механизм взаимодействия клетки с микро- и наночастицами // Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології. Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies. – 2014, т. 12, № 3, – С. 417–450.
11. Иманакунов Б.И., Лукина Л.И., Малаева Х.С., Грищенко Н.И., Осмоналиева С.О. Взаимодействие микроорганизмов, выделенных из золотоносной руды одного из месторождений Киргизии с коллоидными частицами золота // Известия АН Киргизской ССР. Химико-технологические и биологические науки. – 1989, №2, с. 12-16.

12. Методические разработки к практикуму по коллоидной химии / Под ред. И.В. Перлова – М., 1976, 37 с.

**Лукина Лидия Ивановна**

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь  
Кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры  
«Радиоэкология и экологическая безопасность»  
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33  
Тел. +79787092946,  
LILukina@sevsu.ru

**Ковалёв Николай Ильич**

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь  
Кандидат технических наук, зав.НИЛ «Ядерно-химические технологии»  
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33  
Тел. +79787453397,  
NIKovalev@sevsu.ru

---

LUKINA L.I., KOVALEV N.I.

## **NANOBIOTECHNOLOGY AS ONE OF THE PROMISING METHODS FOR EXTRACTING FINE GOLD**

**Abstract.** Due to the presence of finely disseminated nanosized gold particles in sulfide and arsenopyrite ores, the use of traditional technology for the enrichment of gold-containing refractory ores is ineffective. Therefore, the problem of developing and introducing into the gold mining industry an effective environmentally friendly biotechnology for the extraction of submicroscopic gold from refractory ores using metalphilic microorganisms is very relevant. The selectivity of microorganism strains isolated from natural ores of individual deposits that are capable of selectively accumulating fine gold has been shown.

**Keywords:** nanobiotechnology, refractory ores, fine gold, bioflootation, microorganism strains.

### **BIBLIOGRAPHY**

1. Ovcharenko F. D., Pertsov N. V., Ulberg Z. R., Kogan B. S., Estrela-Llopis V. R., The phenomenon of selective heterocoagulation of mineral colloidal particles to microorganisms. Discovery Diploma No. 361; state registration 12/20/1990.
2. Prokopenko V.A., Kovzun I.G., Ulberg Z.R. Creative potential of scientific discovery // Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine. - 2014. - No. 10. - P. 52-61.
3. Kolmogortsev B.V., Varenichev A.A. Problems of processing poor and refractory gold ores // Mining Information and Analytical Bulletin. 2016, - No. 2. S. – 204-218
4. Kevin A. Foo, Murray D. Bath, Ismay A., and John H. Canterford, Proc. Of Joint Intl Meeting Between SMEs and Aus IMW Gold Forum Technology and Practice—World Gold-89 (Reno—Littleton, CO, Nov. 5–8, 1989), p. 233.
5. Karmazin. V.V. Increasing the extraction of small and thin gold is the basis of gold mining in Russia in the near future // Gold mining industry. – No. 6 (36). 2009. – pp. 29-33
6. Piskunova N., Kamashov D. Knowledge of the depths of the mineral nanoworld // Bulletin of the Institute of Geology of the Komi Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. 2009. – No. 6. – P. 1-6.
7. Sanakulov K.S., Ergashev U.A., Gafurov K.U. Factor of flotation effect during bacterial oxidation of sulfide gold-bearing minerals // Mining Bulletin of Uzbekistan. – Navoi, 2017. – No. 2. – pp. 144-148.
8. Kovalchuk E.V., Tagirov B.R., Vikentyev I.R. and others. “Invisible” gold in synthetic and natural arsenopyrite crystals (Vorontsovskoye deposit, Northern Urals) // Geology of ore deposits. - Volume 61, No. 5 – 2019. – P. 62-83.
9. Ulberg Z.R., Vashchenko A.A. Biocolloidal chemistry, bioflootation extraction of nano- and colloidal gold from solutions and mineral dispersions // Nanosystems, nanomaterials, nanotechnologies. Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies. – 2008, vol. 6, no. 2, – pp. 331–351
10. Ulberg Z.R., Gruzina T.G., Dukhin A.S. Colloid-biochemical mechanism of interaction of cells with micro- and nanoparticles // Nanosystems, nanomaterials, nanotechnologies. Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies. – 2014, vol. 12, no. 3, – pp. 417–450.
11. Imanakunov B.I., Lukina L.I., Malaeva Kh.S., Grishchenko N.I., Osmonalieva S.O. Interaction of microorganisms isolated from gold ore of one of the deposits of Kyrgyzstan with colloidal gold particles // Izvestia of the Academy of Sciences of the Kyrgyz SSR. Chemical, technological and biological sciences. – 1989, No. 2, p. 12-16.
12. Methodological developments for the workshop on colloid chemistry / Ed. I.V. Perlova - M., 1976, 37 p.

**Lukina Lidiya Ivanovna**

FGAOU VO "Sevastopol State University", Sevastopol  
Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Radioecology  
and environmental technology  
299053, Sevastopol, st. University, 33  
Tel. +79787092946  
LILukina@sevsu.ru

**Kovalev Nikolay Ilyich**

FGAOU VO "Sevastopol State University", Sevastopol  
Candidate of Technical Sciences, Head of the Research  
Laboratory Nuclear Chemical Technologies  
299053, Sevastopol, st. University, 33  
Tel. +79787453397,  
NIKovalev@sevsu.ru

МОИСЕЕВ Д.В., БРЮХОВЕЦКИЙ А.А.

## ЭПИДЕМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ШИРОКОВЕЩАТЕЛЬНЫХ СООБЩЕНИЙ В ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЯХ

**Аннотация.** Протоколы оповещения об аварийных ситуациях в сетях VANET предусматривают передачу информационных сообщений в широковещательном режиме от узла к узлу. При этом возникают противоречивые требования к процессу передачи, когда необходимо искать компромисс между увеличением радиуса передачи, что приводит к меньшему количеству переходов для достижения узла назначения, и эффективной потерей полосы пропускания на каждом узле в результате увеличения дальности передачи. Поэтому для разрешения такого противоречия требуется разработка специализированных алгоритмов, которые позволяют снизить задержку при передаче сообщений максимальному количеству узлов, расположенных в критической зоне для предотвращения аварийных ситуаций на шоссе. Для этой цели предлагается использовать подход, базирующийся на основе моделей теории эпидемий. Представлены динамика состояния узлов в процессе передачи информационных сообщений. Приведены результаты анализа модельных экспериментов, которые позволяют оценить влияние таких факторов как плотность узлов, диапазон связи, вероятности передачи сообщений восприимчивым узлам, вероятности запрета на ретрансляцию и др. Полученные результаты исследования подтверждают целесообразность применения моделей теории эпидемий при разработке и оценке характеристик алгоритмов распространения широковещательных сообщений в транспортных сетях. Представленный материал является продолжением работ авторов, полученных ранее при разработке модифицированных моделей искусственных иммунных систем для обнаружения уязвимостей беспилотных транспортных средств.

**Ключевые слова:** теория эпидемий, *ad hoc* сети VANET, широковещательный трафик, интеллектуальные транспортные системы.

### Введение

Беспроводные средства связи и сервисы находят свое применение во всех сферах нашей жизни. Транспорт – это один из тех аспектов, в которых интеллектуальные вычислительные устройства используются в транспортных средствах одновременно с надежной беспроводной связью для поддержки сетевых вычислений. Беспроводная связь позволяет осуществлять взаимодействие как между транспортными средствами (V2V), так и между транспортными средствами и стационарной инфраструктурой (V2I), формируя автомобильную сеть *ad hoc* (VANET) для обмена сообщениями, содержащими информацию не только о безопасности, но и о дорожном движении (например, местоположение, скорость и направление), сообщения о совместной информированности транспортных средств, рекламные сообщения, сообщения-анонсы приложений, мультимедиа и др. [1-3].

В настоящее время уже доступно множество приложений для обеспечения безопасности, которые реагируют на аварии. Такие приложения нацелены на обеспечение как индивидуальной безопасности, так и на катастрофический сценарий, когда причиной серийных аварий являются внезапные поломки или столкновения. Следовательно, важно обеспечить возможность предупреждения о столкновении и внезапной поломке находящихся поблизости транспортных средств. Когда бортовые датчики обнаруживают аварию или внезапную поломку, информация должна быть передана в виде экстренного сообщения всем транспортным средствам в зоне потенциальной опасности, которая простирается за транспортным средством-источником вдоль шоссе.

Передача сообщений о безопасности считается чувствительной к задержкам и направлена на преодоление сложности и ограничений во времени реакции водителей для принятия надлежащих мер в связи с потенциальным инцидентом, который может произойти в будущем. Таким образом, надежность передачи сообщений и задержка являются основными факторами показателей качества обслуживания для приложений безопасности в сетях VANETs.

Наилучшей стратегией маршрутизации для доставки сообщения всем узлам в определенной области является широковещательная передача. Фундаментальная широковещательная природа беспроводных сетей делает широковещание идеальным

инструментом для функций обнаружения, маршрутизации и локализации, которые имеют решающее значение для беспроводных систем ad-hoc [4,5]. В то же время, поскольку технологические тенденции продолжают снижать размер, энергопотребление и стоимость встраиваемых беспроводных сетевых устройств, масштаб сетей, построенных с их помощью, продолжает расти. В результате, учитывая высокую плотность этих сенсорных сетей, перед приложениями, использующими широковещательную передачу, встает задача управления пропускной способностью канала для обеспечения хорошей производительности с точки зрения качества связи и охвата широковещательной передачей. Эта задача возникает потому, что, если все узлы будут действовать жадно, используя максимальный диапазон, канал будет переполнен пакетами. Поэтому вероятность того, что какие-либо соседи получат неискаженные сообщение, будет приближаться к нулю в плотных сетях из-за коллизий [6]. Кроме того, сеть без хорошего покрытия широковещательной рассылки вряд ли будет обладать хорошей пропускной способностью или задержкой, если многие узлы не смогут принять широковещательное сообщение, у них, скорее всего, возникнут проблемы с получением обычного одноадресного сообщения из-за фундаментальных свойств канала беспроводной передачи, когда один отправитель воздействует на множество получателей.

Надежная работа этих приложений зависит от эффективной передачи сообщений различного типа с требуемым качеством (QoS) обслуживания [7,8]. В частности, приложения безопасности становятся возможными благодаря передаче двух основных типов сообщений. Периодические сообщения о безопасности с одним переходом используются для поддержки приложений совместной осведомленности, позволяющих транспортным средствам поддерживать безопасную среду вождения, тогда как предупреждающие сообщения распространяют уведомления, управляемые событиями, на все транспортные средства в пределах определенной географической зоны [9]. Поскольку предупреждающие сообщения должны передаваться в места, потенциально находящиеся вне зоны действия любого отдельного транспортного средства, для поддержки этого класса трафика необходимы передачи с несколькими переходами. Таким образом, методы широковещательной передачи с несколькими переходами были разработаны для многих приложений в чрезвычайных ситуациях на транспорте, например, для предупреждения после аварии, предупреждения о состоянии дороги, уведомления о приближающихся машинах скорой помощи и диагностики транспортных средств [10].

Самый простой способ широковещательной передачи сообщения – разрешить каждому получателю повторную широковещательную передачу. Однако с увеличением числа узлов возникают коллизии пакетов и увеличивается задержка из-за повторных передач. Чтобы преодолеть ограничения, связанные с насыщением сети пакетами и повысить масштабируемость широковещательной передачи, для ретрансляции сообщений могут быть выбраны только определенные узлы.

Связь с несколькими переходами (широковещательный штурм) является серьезной проблемой. Распространение широковещательных сообщений по сети может потреблять всю доступную полосу пропускания и перенасыщать сеть. Более того, сообщения о безопасности и предупреждающие сообщения с несколькими переходами передаются по каналу управления выделенного спектра для связи транспортных средств [11]. Это может привести к серьезным помехам между двумя типами сообщений. Ситуация еще более усугубляется строгими требованиями к пакетной передаче сообщений о безопасности (с частотой генерации пакетов 1-10 Гц), что приводит к столкновениям скрытых узлов. Скрытые коллизии узлов не могут быть обнаружены механизмом широковещательной передачи в стандарте IEEE 802.11 [12]. В этом случае требуется множество избыточных повторных передач с несколькими переходами, которые способствуют увеличению задержки распространения с несколькими переходами и отрицательно влияют на скорость приема сообщений о безопасности.

Одним из направлений исследования методов широковещательной рассылки сообщений в транспортных сетях является эпидемическая маршрутизация [13-14]. Представляющие интерес показатели включают плотность узлов на магистрали, диапазон связи, степень покрытия узлов в зоне потенциальной опасности (зона значимости простирается за

транспортным средством-источником экстренного сообщения), среднее количество инфицированных узлов в любой момент времени, узлов, приобретших иммунитет и другие. В соответствии с теорией эпидемии каждый инфицированный узел пересыпает сообщение любому узлу в пределах дальности передачи с учетом ограничения на время передачи. Эпидемическая маршрутизация может быть неэффективной из-за больших затрат на связь, когда узлы ограничены в пространстве и энергопотреблении. Однако изучение производительности эпидемической маршрутизации позволяет получить хорошее представление о нижних или верхних границах таких показателей производительности, как средняя задержка доставки и среднее количество отправлений зараженных узлов в случае использования других схем маршрутизации. Эти результаты могут быть использованы для разработки, оценки и оптимизации схем маршрутизации.

Ряд исследований посвящен разработке аналитических моделей для оценки производительности различных схем маршрутизации. Марковские модели и дифференциальные уравнения – это два основных подхода к анализу производительности сетей в работах [15,16], в которых предложены модели для методов оценки связи, основанные на теории эпидемий. В работе [17] была предложена непрерывная по времени цепь Маркова для маршрутизации эпидемий в гетерогенной сети с двумя классами узлов. В работе [18] для моделирования применяются схемы распространения эпидемии с ограниченным доступом и ожидания, а также схемы предотвращения контактов между узлами.

Таким образом, задача максимизации количества получателей широковещательного трафика в сочетании со сниженной нагрузкой на сеть за ограниченное время является актуальной и представляет научный и практический интерес. Представленный материал является продолжением работ авторов, полученных ранее [19 - 27] при разработке модифицированных моделей искусственных иммунных систем для обнаружения уязвимостей беспилотных транспортных средств.

### Основная часть

**Модель системы.** Будем рассматривать трехполосное шоссе в одном направлении (рисунок 1). Направление движения транспортных средств противоположно направлению передачи сообщений.

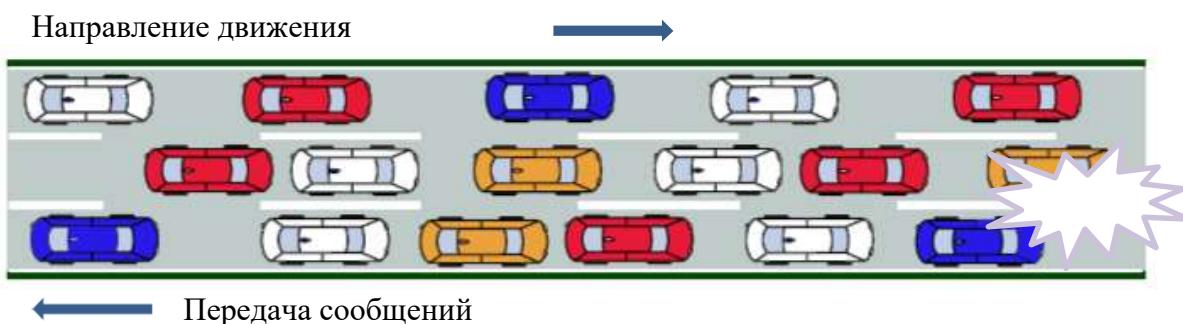


Рисунок 1 – Фрагмент трехполосного шоссе

Для обеспечения бесперебойного движения пропускная способность автомагистралей с расчетной скоростью 90-120 км/час составляет около 1300 транспортных средств на километр в расчете на полосу движения (узел/км/полоса) [10]. Транспортные средства поступают в систему в соответствии с пуассоновским процессом с учетом расстояния между узлами и с интенсивностью поступления, которая равна плотности транспортного потока. Будем предполагать, что плотность транспортного потока распределена равномерно между полосами движения и что на модель транспортного потока не влияют инциденты во время движения. Все транспортные средства оснащены приемниками глобальной системы позиционирования (GPS) и имеют одинаковые возможности радиосвязи. Радиосвязь разрешена по одному из семи каналов связи ближнего радиуса действия (DSRC). Канал DSRC поддерживает высокую скорость передачи данных – 6 Мбит/с с дальностью передачи до 200 метров.

В зависимости от плотности транспортного потока на шоссе возможные взаимодействия между транспортными средствами могут накладывать ограничения на движение транспортных средств. При низкой плотности транспортного потока эти взаимодействия незначительны. В результате транспортные средства перемещаются независимо друг от друга. Поступление транспортных средств на шоссе моделируется как пуассоновский процесс с частотой  $3\lambda$ , которая равна плотности движения и распределяется поровну между полосами движения. Предполагая, что каждая полоса движения моделируется аналогично комбинированному шоссе, вероятность появления  $n$  транспортных средств на участке дороги одинаковой длины  $L$  на полосу движения определяется как

$$P(n) = a^n/n! * e^{-a} \quad (1)$$

где  $a = \lambda * L$ .

Для низкой плотности трафика имеет место экспоненциальное распределение интервалов между транспортными средствами. Дистанцией движения считается расстояние от передней части транспортного средства до передней части следующего за ним транспортного средства. С учетом минимально допустимого расстояния  $l$  между соседними автомобилями на одной полосе движения, чтобы избежать каких-либо столкновений между транспортными средствами, будем использовать функцию плотности вероятности расстояния между автомобилями [10]:

$$f(L) = \begin{cases} \lambda * e^{-\lambda(L-l)}, & L \geq l \\ 0, & L < l \end{cases} \quad (2)$$

Предполагается, что плотность на шоссе имеет примерно постоянное расстояние между соседними транспортными средствами, которые могут ускорять или замедлять движение, чтобы адаптироваться к движению впереди идущего транспортного средства.

В соответствии с теорией эпидемий (модель *SIR*) рассматриваются три типа состояния узлов:

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= -\alpha I S \\ \frac{dI}{dt} &= \alpha I S - \gamma I \\ \frac{dR}{dt} &= \gamma I \end{aligned} \quad (3)$$

В модели используются следующие обозначения:

$S$  – восприимчивые к инфекции узлы,

$I$  – инфицированные узлы,

$R$  – узлы получившие иммунитет,

$\alpha$  – вероятность передачи инфекции одним инфицированным в единицу времени при контакте с восприимчивым,

$\gamma$  – вероятность приобретения иммунитета в единицу времени среди инфицированных,

$N$  – общее число узлов.

Предполагается, что имеет место соотношение:  $S(t) + I(t) + R(t) = N(t)$ .

Одной из задач при организации широковещательной рассылки является обеспечение надежности передачи экстренного сообщения всем узлам в зоне безопасности в сочетании с низкой задержкой. В качестве решения могут использоваться протоколы, которые ограничивают число узлов, осуществляющих ретрансляцию сообщений. Это позволит снизить число коллизий, которые приводят к потерям пакетов, скрытым узлам и, как следствие, к увеличению задержки из-за повторных передач. Поэтому предлагается использовать ограниченное число узлов, выполняющих ретрансляцию.

Будем полагать, что ретрансляцию сообщений выполняют узлы, расположенные ближе всего к границе дальности связи. Обозначим  $L$  – дальность связи.  $L_0$  - расстояние, в пределах которого располагаются узлы, не участвующие в ретрансляции,  $L > L_0$ .

Обозначим  $P_\alpha$  – вероятность появления инфицированных узлов при контакте с восприимчивыми:

$$P_\alpha = P_L - P_{L_0} \quad (4)$$

Вероятности  $P_L, P_{L0}$  определяются в соответствии с выражениями:

$$P_L = (1 - e^{-\lambda(L-l)}) \text{ — появление хотя бы одного узла в диапазоне } L,$$

$$P_{L0} = (1 - e^{-\lambda(L_0-l)}) \text{ — появление хотя бы одного узла в диапазоне } L_0.$$

Поэтому выражение (3) для  $dI(t)/dt$  приобретает вид:

$$dI(t)/dt = ((1 - e^{-\lambda(L-l)}) - (1 - e^{-\lambda(L_0-l)})) IS - \gamma I \quad (5)$$

Таким образом, данная модель позволяет исследовать качество процесса передачи широковещательных сообщений при влиянии таких параметров как плотность, дальность связи, доли узлов, участвующих в ретрансляции и др.

При моделировании использовались следующие значения основных параметров:

- плотность узлов  $\lambda \in (1/30 - 1/50)$ ,
- дальность связи  $L \in (100 - 200)$ ,
- значение  $L_0 \in (50 - 90)$ .

В ходе проведения модельных экспериментов исследовалось влияние:

- дальности связи  $L$ ,
- величины  $L_0$ ,
- плотности узлов

на степень покрытия узлов и длительность передачи сообщений.

На рисунке 2 представлены результаты моделирования для трех состояний узлов.

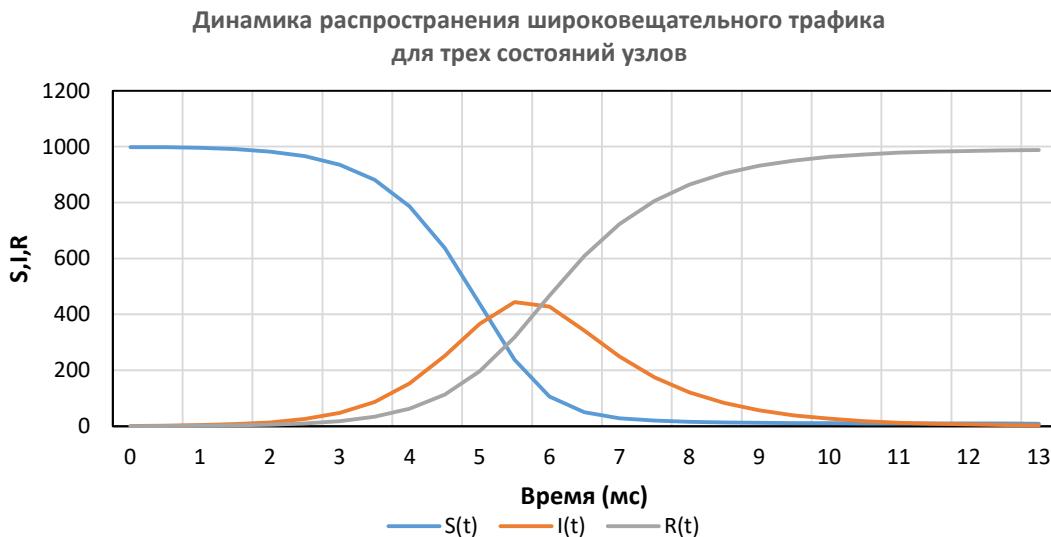


Рисунок 2 – Результаты моделирования распространения широковещательного трафика

Моделирование выполнялось при следующих значениях основных параметров:

$$L = 170, \quad L_0 = 70, \quad \lambda = 1/40, \quad \Delta t = 0.5,$$

$$I(0) = 1, \quad S(0) = N-1, \quad R(0) = 0, \quad N = 1000.$$

Как следует из полученных графиков число покрытых узлов к 13-ой мсек составляет 988, что соответствует 1,2% узлов, которые не получили широковещательное сообщение. Увеличение значения  $L_0$  приводит к увеличению времени распространения сообщения, так уменьшается число узлов, выполняющих ретрансляцию. Так, при  $L_0 = 95$  к 13-ой мсек сообщение получили только 926 узлов. Аналогичный эффект имеет место при уменьшении дальности связи, например, до значения 140. В этом случае широковещательное сообщение к указанному моменту времени получат только 893 узла. Выбор исследуемых параметров зависит от скорости, плотности узлов и может быть рекомендован на основе значений, приведенных в таблице 1 [10], в которой указаны состояния трафика для различных плотностей.

Таблица 1. Состояния трафика для различных плотностей узлов

Скорость (км/ч)	Плотность (узлы/км)	Состояние трафика
>100	$\leq 8$	свободное
> 90	$\leq 13$	почти свободное
> 85	$\leq 19$	стабильное
> 74	$\leq 27$	граница нестабильности
> 48	$\leq 42$	перегружен
< 48	$> 42$	высока вероятность столкновения

Предложенная модель ориентирована на исследование трафика низкой плотности. Как следует из полученных результатов:

- Увеличение дальности связи сокращает время покрытия и увеличивает процент покрытия, так как увеличивается вероятность появления числа узлов выполняющих ретрансляцию в области ( $L - L_0$  ).
- Чем больше значение  $L_0$  тем больше времени требуется на передачу сообщений, так как уменьшается число инфицированных узлов, а значит снижается интенсивность передачи ретрансляции.
- Изменение плотности узлов в указанных пределах  $\lambda$  не приводит к существенному изменению длительности передачи сообщений.

### Заключение

Алгоритмы оповещения об аварийных ситуациях в сетях VANET предусматривают передачу информационных сообщений в широковещательном режиме от узла к узлу. При этом возникают противоречивые требования к процессу передачи, когда необходимо искать компромисс между увеличением радиуса передачи, что приводит к меньшему количеству переходов для достижения узла назначения, и эффективной потерей полосы пропускания на каждом узле в результате увеличения дальности передачи. Поэтому для разрешения такого противоречия требуется разработка специализированных алгоритмов, которые позволят снизить задержку при передаче сообщений максимальному количеству узлов, расположенных в критической зоне для предотвращения аварийных ситуаций на шоссе. Для этой цели предлагается использовать подход, базирующийся на основе моделей теории эпидемий. Представлены динамика состояния узлов в процессе передачи информационных сообщений. Приведены результаты анализа модельных экспериментов, которые позволяют оценить влияние таких факторов как плотность узлов, диапазон связи, вероятности передачи сообщений восприимчивым узлам, вероятности запрета на ретрансляцию и др. Полученные результаты исследования подтверждают целесообразность применения моделей теории эпидемий при разработке и оценке характеристик алгоритмов распространения широковещательных сообщений в транспортных сетях. Представленный материал является продолжением работ авторов, полученных ранее при разработке модифицированных моделей искусственных иммунных систем для обнаружения уязвимостей беспилотных транспортных средств.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. General Motors. Automatic crash response. [http://www.onstar.com/us\\_english/jsp/plans/acr.jsp](http://www.onstar.com/us_english/jsp/plans/acr.jsp), 2009.
2. N. Wisitpongphan, P. F. B. Mudalige, V. Sadekar, and O. Tonguz. Routing in sparse vehicular ad hoc wireless networks// IEEE. Selected Areas Communications, Oct. 2007, Vol. 25, No. 8 pp.1538-1556.
3. R. Chen, W.-L. Jin, A. Regan. Broadcasting safety information in vehicular networks: issues and approaches// IEEE Network, 2010, 24(1), pp.20–25.
4. M. Durresi, A. Durresi, and L. Barolli. Emergency broadcast protocol for inter-vehicle communications // Proc. IEEE 11th Int. Conf. Parallel and Distributed Systems, July 2005, Vol. 2, pp. 402 – 406.
5. Y. Toor, P. Muhlethaler, A. Laouiti. Vehicle ad hoc networks: applications and related technical issues //IEEE Commun. Surv. Tutor. 2008, 10(3), pp.74–88.

6. F. Li and Y. Wang. Routing in vehicular ad hoc networks: A survey // IEEE Vehicular Technology Magazine, June, 2007, Vol. 2, No. 2, pp. 12-22.
7. D. Caveney. Cooperative vehicular safety applications// IEEE Control Syst. 2010,30(4), pp.38–53.
8. X. Ma, J. Zhang, X. Yin, KS. Trivedi. Design and analysis of a robust broadcast scheme for VANET safety-related services// IEEE Trans. Vehic. Technol.2012, 61(1), pp.46–61.
9. C.-L. Huang, YP. Fallah, R. Sengupta, H. Krishnan. Adaptive intervehicle communication control for cooperative safety systems// IEEE Network.2010, 24(1), pp.6–13.
10. A.D. May. Traffic flow fundamentals. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, 1990. – 464 p.
11. C.Campolo, A. Molinaro. Multichannel communications in vehicular ad hoc networks: a survey // IEEE Commun. Mag 2013, 51(5), pp.158-169.
12. The Institute of Electrical and Electronics Engineers: IEEE Std 802.11-2007 (Revision of IEEE Std 802.11-1999), Technical report. IEEE, New York, USA, 2007.
13. Y. Yang, C. Zhao, S. Yao, W. Zhang, X. Ge, and G. Mao. Delay performance of network-coding-based epidemic routing// IEEE Trans. Veh. Technol., 2016,vol. 65, no. 5, pp. 3676–3684.
14. P. Sermpezis and T. Spyropoulos. Delay analysis of epidemic schemes in sparse and dense heterogeneous contact networks//IEEE Trans. Mobile Comput., 2017,vol. 16, no. 9, pp. 2464–2477.
15. X. Zhang, G. Neglia, J. Kurose, and D. Towsley. Performance modeling of epidemic routing // Computer Network, 2007,vol. 51, no. 10, pp.2867–2891.
16. E. Hernández-Orallo, M. Murillo-Arcila, J. C. Cano, C. T. Calafate, J. A. Conejero, and P. Manzoni. An analytical model based on population processes to characterize data dissemination in 5G opportunistic networks// IEEE Access, 2018, vol. 6, pp. 1603–1615.
17. Y.-K. Ip, W.-C. Lau, and O.-C. Yue. Performance modeling of epidemic routing with heterogeneous node types //Proc. IEEE ICC, Beijing, China, 19–23 May 2008, pp. 219–224.
18. T. Osuki, K. Sakai, and S. Fukumoto. Contact avoidance routing in delay tolerant networks // Proc. IEEE INFOCOM, 2017, pp.1–9.
19. A. V. Skatkov, A. A. Bryukhovetskiy, D. V. Moiseev. Adaptive vulnerability detection model for unmanned vehicles drugs based on artificial immune systems// 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 734 012028 <https://doi.org/10.1088/1757-899X/734/1/012028>.
20. A. V. Skatkov, D. V. Moiseev, A. A. Bryukhovetskiy. Adaptation of mechanisms of artificial immune systems for cooperative resistance to threats of intrusion into autonomous information and telecommunication facilities // Information and communication technologies, T.19, №4, 2021, pp.410-417.
21. Moiseev, D. V. Intelligent decision - making support on the level of encryption of information transmitted in the UMV information exchange channels D V Moiseev, A A Bryukhovetskiy and A V Skatkov / D. V. Moiseev, A. A. Bryukhovetskiy, A. V. Skatkov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Krasnoyarsk, 18–21 ноября 2019 года / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Vol. 734. – Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. – P. 12086. – DOI 10.1088/1757-899X/734/1/012086.
22. Sapozhnikov, N. Advantages of using the probabilistic form of information representation in information-control systems / N. Sapozhnikov, A. Polyakov, D. Moiseev // 2019 International Science and Technology Conference "EastConf", EastConf 2019, Vladivostok, 01–02 марта 2019 года. – Vladivostok, 2019. – P. 8725406. – DOI 10.1109/Eastonf.2019.8725406.
23. Modeling of monitoring processes of structurally heterogeneous technological objects / A. Skatkov, V. Shevchenko, D. Voronin, D. Moiseev // MATEC Web of Conferences, Sevastopol, 11–15 сентября 2017 года. Vol. 129. – Sevastopol: EDP Sciences, 2017. – P. 03022. – DOI 10.1051/matecconf/201712903022.
24. Skatkov, A.V. Vulnerability detection model in the interfaces of unmanned vehicles based on artificial immune systems / A.V. Skatkov, D. V. Moiseev, A. A. Bryukhovetsky // JOP conference series "Metrological support of innovative technologies", Krasnoyarsk, March 04, 2020 / Krasnoyarsk Scientific and Technical Chamber of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Volume 1515. – Krasnoyarsk, Russia: Institute of Physics and Publishing house VGD, 2020. – p. 22043. – DOI 10.1088/1742-6596/1515/2/022043.
25. Bryukhovetsky, A. Investigation of the vulnerability detection model of UMV interfaces based on the information criterion / A. Bryukhovetsky, V. Miryanova, D. Moiseev // III International Seminar on Modeling, information Processing and Computing (MIP: Computing-2021), Krasnoyarsk, May 28, 2021. Volume 2899. – Krasnoyarsk, Russia: CEUR-WS, 2021. – pp. 162-168. – DOI 10.47813/dnit-mip3/2021-2899-162-168.
26. Moiseev, D. A method for detecting vulnerabilities in unmanned vehicle interfaces based on continuous sampling of values / D. Moiseev, A. Bryukhovetsky // III International Seminar on Modeling, Information Processing and Computing (MIP: Computing-2021), Krasnoyarsk, May 28, 2021. Volume 2899. – Krasnoyarsk, Russia: CEUR-WS, 2021. – pp. 43-47. – DOI 10.47813/dnit-mip3/2021-2899-43-47. – EDN CHENSVO.
27. Moiseev, D. Models of the threat of the spread of viral ideas in information and telecommunications networks / D. Moiseev, V. Miryanova // III International Seminar on Modeling, information Processing and Computing (MIP: Computing-2021), Krasnoyarsk, May 28, 2021. Volume 2899. – Krasnoyarsk, Russia: CEUR-WS, 2021. – pp. 175-180. – DOI 10.47813/dnit-mip3/2021-2899-175-180.

**Моисеев Дмитрий Владимирович**

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь  
Доктор технических наук, доцент, директор института информационных технологий, заведующий кафедрой «Информационные технологии и компьютерные системы»  
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33  
Тел. +7862417741 (для вложенного 1384),  
DVMoiseev@sevsu.ru

**Брюховецкий Алексей Алексеевич**

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь  
Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Информационные технологии и компьютерные системы»  
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33  
Тел. +7862417741 (для вложенного 1384),  
AABryukhovetskiy@sevsu.ru

---

MOISEEV D.V., BRYUKHOVETSKIY A.A.

## **THE EPIDEMIC MODEL OF THE DISTRIBUTION OF BROADCAST MESSAGES IN TRANSPORT NETWORKS**

**Abstract.** Emergency notification protocols in VANET networks provide for the transmission of information messages in broadcast mode from node to node. At the same time, conflicting requirements arise for the transmission process, when it is necessary to find a compromise between increasing the transmission radius, which leads to fewer transitions to reach the destination node, and effective loss of bandwidth at each node as a result of increasing the transmission range. Therefore, to resolve such a contradiction, it is necessary to develop specialized algorithms that will reduce the delay in transmitting messages to the maximum number of nodes located in the critical zone to prevent accidents on the highway. For this purpose, it is proposed to use an approach based on models of epidemic theory. The dynamics of the state of nodes in the process of transmitting information messages are presented. The results of the analysis of model experiments are presented, which allow us to assess the influence of such factors as node density, communication range, the probability of transmitting messages to susceptible nodes, the probability of a ban on retransmission, etc. The obtained research results confirm the expediency of using epidemic theory models in the development and evaluation of the characteristics of algorithms for the distribution of broadcast messages in transport networks. The presented material is a continuation of the work of the authors obtained earlier in the development of modified models of artificial immune systems for detecting vulnerabilities of unmanned vehicles.

**Keywords:** epidemic theory, ad hoc VANET networks, broadcast traffic, intelligent transport systems.

## **BIBLIOGRAPHY**

1. General Motors. Automatic crash response. [http://www.onstar.com/us\\_english/jsp/plans/acr.jsp](http://www.onstar.com/us_english/jsp/plans/acr.jsp), 2009.
2. N. Wisitpongphan, P. F. B. Mudalige, V. Sadekar, and O. Tonguz. Routing in sparse vehicular ad hoc wireless networks// IEEE. Selected Areas Communications, Oct. 2007, Vol. 25, No. 8 pp.1538-1556.
3. R. Chen, W.-L. Jin, A. Regan. Broadcasting safety information in vehicular networks: issues and approaches// IEEE Network, 2010, 24(1), pp.20–25.
4. M. Durresi, A. Durresi, and L. Barolli. Emergency broadcast protocol for inter-vehicle communications // Proc. IEEE 11th Int. Conf. Parallel and Distributed Systems, July 2005, Vol. 2, pp. 402 – 406.
5. Y. Toor, P. Muhlethaler, A. Laouiti. Vehicle ad hoc networks: applications and related technical issues // IEEE Commun. Surv. Tutor. 2008, 10(3), pp.74–88.
6. F. Li and Y. Wang. Routing in vehicular ad hoc networks: A survey // IEEE Vehicular Technology Magazine, June, 2007, Vol. 2, No. 2, pp. 12-22.
7. D. Caveney. Cooperative vehicular safety applications// IEEE Control Syst. 2010,30(4), pp.38–53.
8. X. Ma, J. Zhang, X. Yin, KS. Trivedi. Design and analysis of a robust broadcast scheme for VANET safety-related services// IEEE Trans. Vehic. Technol.2012, 61(1), pp.46–61.
9. C.-L. Huang, YP. Fallah, R. Sengupta, H. Krishnan. Adaptive intervehicle communication control for cooperative safety systems// IEEE Network.2010, 24(1), pp.6–13.
10. A.D. May. Traffic flow fundamentals. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, 1990. – 464 p.
11. S.Campolo, A. Molinaro. Multichannel communications in vehicular ad hoc networks: a survey // IEEE Commun. Mag 2013, 51(5), pp.158-169.
12. The Institute of Electrical and Electronics Engineers: IEEE Std 802.11-2007 (Revision of IEEE Std 802.11-1999), Technical report. IEEE, New York, USA, 2007.
13. Y. Yang, C. Zhao, S. Yao, W. Zhang, X. Ge, and G. Mao. Delay performance of network-coding-based epidemic routing// IEEE Trans. Veh. Technol., 2016,vol. 65, no. 5, pp. 3676–3684.
14. P. Sermpezis and T. Spyropoulos. Delay analysis of epidemic schemes in sparse and dense heterogeneous contact networks//IEEE Trans. Mobile Comput., 2017,vol. 16, no. 9, pp. 2464–2477.
15. X. Zhang, G. Neglia, J. Kurose, and D. Towsley. Performance modeling of epidemic routing // Computer Network, 2007,vol. 51, no. 10, pp.2867–2891. 16. E. Hernández-Orallo, M. Murillo-Arcila, J. C. Cano, C. T. Calafate, J.

- A. Conejero, and P. Manzoni. An analytical model based on population processes to characterize data dissemination in 5G opportunistic networks// IEEE Access, 2018, vol. 6, pp. 1603–1615.
17. Y.-K. Ip, W.-C. Lau, and O.-C. Yue. Performance modeling of epidemic routing with heterogeneous node types //Proc. IEEE ICC, Beijing, China, 19–23 May 2008, pp. 219–224.
18. T. Osuki, K. Sakai, and S. Fukumoto. Contact avoidance routing in delay tolerant networks // Proc. IEEE INFOCOM, 2017, pp.1–9.
19. A. V. Skatkov, A. A. Bryukhovetskiy, D. V. Moiseev. Adaptive vulnerability detection model for unmanned vehicles drugs based on artificial immune systems// 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 734 012028 <https://doi.org/10.1088/1757-899X/734/1/012028>.
20. A. V. Skatkov, D. V. Moiseev, A. A. Bryukhovetskiy. Adaptation of mechanisms of artificial immune systems for cooperative resistance to threats of intrusion into autonomous information and telecommunication facilities // Information and communication technologies, vol. 19, No. 4, 2021, pp.410-417.
21. Moiseev, D. V. Intelligent decision - making support on the level of encryption of information transmitted in the UMV information exchange channels D V Moiseev, A A Bryukhovetskiy and A V Skatkov / D. V. Moiseev, A. A. Bryukhovetskiy, A.V. Skatkov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Krasnodar, November 18–21, 2019 / Krasnodar Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Vol. 734. – Krasnodar: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. – P. 12086. – DOI 10.1088/1757-899X/734/1/012086.
22. Sapozhnikov, N. Advantages of using the probabilistic form of information representation in information-control systems / N. Sapozhnikov, A. Polyakov, D. Moiseev // 2019 International Science and Technology Conference "EastConf", EastConf 2019, Vladivostok, March 01-02, 2019. – Vladivostok, 2019. – P. 8725406. – DOI 10.1109/Eastonf.2019.8725406.
23. Modeling of monitoring processes of structurally heterogeneous technological objects / A. Skatkov, V. Shevchenko, D. Voronin, D. Moiseev // MATEC Web of Conferences, Sevastopol, September 11-15, 2017. Vol. 129. – Sevastopol: EDP Sciences, 2017. – P. 03022. – DOI 10.1051/matecconf/201712903022.
24. Skatkov, A.V. Vulnerability detection model in the interfaces of unmanned vehicles based on artificial immune systems / A.V. Skatkov, D. V. Moiseev, A. A. Bryukhovetsky // JOP conference series "Metrological support of innovative technologies", Krasnoyarsk, March 04, 2020 / Krasnoyarsk Scientific and Technical Chamber of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Volume 1515. – Krasnoyarsk, Russia: Institute of Physics and Publishing house VGD, 2020. – p. 22043. – DOI 10.1088/1742-6596/1515/2/022043.
25. Bryukhovetsky, A. Investigation of the vulnerability detection model of UMV interfaces based on the information criterion / A. Bryukhovetsky, V. Miryanova, D. Moiseev // III International Seminar on Modeling, information Processing and Computing (MIP: Computing-2021), Krasnoyarsk, May 28, 2021. Volume 2899. – Krasnoyarsk, Russia: CEUR-WS, 2021. – pp. 162-168. – DOI 10.47813/dnit-mip3/2021-2899-162-168.
26. Moiseev, D. A method for detecting vulnerabilities in unmanned vehicle interfaces based on continuous sampling of values / D. Moiseev, A. Bryukhovetsky // III International Seminar on Modeling, Information Processing and Computing (MIP: Computing-2021), Krasnoyarsk, May 28, 2021. Volume 2899. – Krasnoyarsk, Russia: CEUR-WS, 2021. – pp. 43-47. – DOI 10.47813/dnit-mip3/2021-2899-43-47.
27. Moiseev, D. Models of the threat of the spread of viral ideas in information and telecommunications networks / D. Moiseev, V. Miryanova // III International Seminar on Modeling, information Processing and Computing (MIP: Computing-2021), Krasnoyarsk, May 28, 2021. Volume 2899. – Krasnoyarsk, Russia: CEUR-WS, 2021. – pp. 175-180. – DOI 10.47813/dnit-mip3/2021-2899-175-180.

**Moiseev Dmitry Vladimirovich**

FGAOU VO "Sevastopol State University", Sevastopol  
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,  
Director of the Institute of Information Technology,  
Head of the Department of Information Technology and  
Computer Systems  
299053, Sevastopol, st. University, 33  
Tel. +7862417741 (ext. 1384),  
DVMoiseev@sevsu.ru

**Bryukhovetsky Alexey Alekseevich**

FGAOU VO "Sevastopol State University", Sevastopol  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Information  
Technology and Computer Systems  
299053, Sevastopol, st. University, 33  
Tel. +7862417741 (ext. 1384),  
AABryukhovetskiy@sevsu.ru

ПАПКОВ С.О.

## АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ КРУЧЕНИИ ВАЛА С ВЫТОЧКАМИ

**Аннотация.** На основе новых теорем о существовании и асимптотическом поведении решений бесконечных систем смешанного интегрально-алгебраического типа строится решение задачи о кручении вала с выточками. Исследуются особенности напряженного состояния, в том числе в угловых точках.

**Ключевые слова:** кручение вала, функция напряжений, бесконечная система, регулярность, асимптотика.

### Введение.

Одной из проблем, возникающей при решении краевых задач теории упругости для тел, имеющих внутренние угловые точки, является описание напряженного состояния вблизи этих точек [1].

Как правило, численные и приближенные методы в данном случае не являются эффективными в связи с наличием бесконечно больших напряжений во внутренних угловых точках. Поэтому требуется отыскание такой аналитической формы решения краевой задачи, которая позволяет добиться выполнения граничных условий с любой требуемой точностью [2].

Ниже, на примере задачи о кручении изотропного вала с выточками (рисунок 1), предлагается один из возможных путей решения данной проблемы.

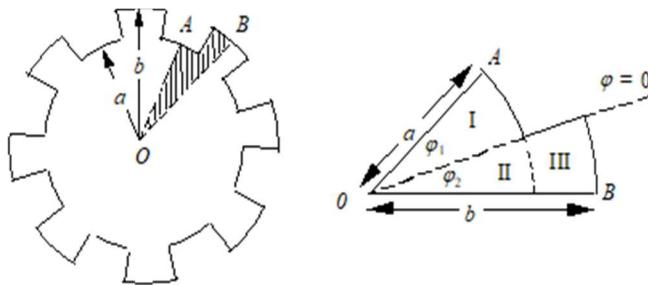


Рисунок 1 – Сечение вала

### Анализ

Аналитическое решение задачи о кручении вала с выточками можно построить с помощью метода функции напряжений [1]. Функция напряжений  $U$  должна в полярных координатах  $(r, \varphi)$  удовлетворять уравнению Пуассона

$$\Delta U \equiv \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} = -2 \quad (1)$$

в области сечения стержня и обращаться в нуль на ее контуре.

При построении функции напряжения  $U$  используется симметрия стержня, которая позволяет рассматривать  $\frac{1}{2n}$ -ю часть сечения (здесь  $n$  – число зубцов или пазов стержня).

Разбиваем  $\frac{1}{2n}$ -ю часть сечения на три простейшие области: I, II, III. Полагаем, что в каждой из областей функция напряжений принимает соответственно значения  $U_I, U_{II}, U_{III}$ .

Переходя к переменной  $t = \ln \frac{r}{a}$  ( $r = ae^t$ ), и представляя функции  $U_i$  в виде

$$U_i(r, \varphi) = -\frac{a^2 e^{2t}}{2} + \Phi_i(t, \varphi), \quad (i = I, II, III),$$

из уравнения (1) получаем относительно  $\Phi_i(t, \varphi)$  дифференциальное уравнение Лапласа

$$\frac{\partial^2 \Phi_i}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 \Phi_i}{\partial \varphi^2} = 0 \quad (2)$$

При замене переменной точка  $r = a$  переходит в точку  $t = 0$ , а точка  $r = b$  в точку  $t = t_1$  ( $t_1 = \ln \frac{b}{a}$ ). Из условий на  $\Gamma$  – границе сечения

$$U \Big|_{\Gamma} = 0, \frac{\partial U}{\partial n} \Big|_{OA} = 0, \frac{\partial U}{\partial n} \Big|_{OB} = 0$$

следуют краевые условия к уравнению (2):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_I}{\partial \varphi} \Big|_{\varphi=\varphi_1} &= \Phi_I(0, \varphi) - \frac{a^2}{2} = \frac{\partial \Phi_{II}}{\partial \varphi} \Big|_{\varphi=-\varphi_2} = \frac{\partial \Phi_{III}}{\partial \varphi} \Big|_{\varphi=-\varphi_2} = \Phi_{III}(t, 0) - \frac{a^2 e^{2t}}{2} = \Phi_{III}(t_1, \varphi) - \frac{b^2}{2} = 0; \\ \Phi_I(t, 0) &= \Phi_{II}(t, 0); \quad \frac{\partial \Phi_I}{\partial \varphi} \Big|_{\varphi=0} = \frac{\partial \Phi_{II}}{\partial \varphi} \Big|_{\varphi=0}; \quad \Phi_{II}(0, \varphi) = \Phi_{III}(0, \varphi); \quad \frac{\partial \Phi_{II}}{\partial t} \Big|_{t=0} = \frac{\partial \Phi_{III}}{\partial t} \Big|_{t=0}. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь  $\varphi_1 = \frac{\pi}{\alpha n}$ ,  $\varphi_2 = \frac{\pi}{n} (1 - \frac{1}{\alpha})$ , ( $\varphi_1 + \varphi_2 = \frac{\pi}{n}$ );  $\alpha \in [1; +\infty)$  – константа, характеризующая ширину зубца.

Функция напряжений  $U$  позволяет рассчитать напряжения, возникающие в стержне, по формулам:  $\tau_{rz} = \frac{G\theta e^{-t}}{a} \frac{\partial \Phi}{\partial \varphi}$ ,  $\tau_{\varphi z} = -\frac{G\theta e^{-t}}{a} (\frac{\partial \Phi}{\partial t} - a^2 e^{2t})$ .

Функции  $\Phi_i(t, \varphi)$  берем в следующем виде:

$$\Phi_I = \sum_{k=1}^{\infty} A_k^{(1)} e^{\alpha_k t} \sin \alpha_k \varphi + \int_0^{\infty} (C^{(1)}(p) sh(p\varphi) + D^{(1)}(p) ch(p\varphi)) \sin p t dp; \quad (t; \varphi) \in \{0 \leq \varphi \leq \varphi_1; t \leq 0\};$$

$$\Phi_{II} = \sum_{k=1}^{\infty} A_k^{(2)} e^{\lambda_k t} \sin \lambda_k \varphi + \int_0^{\infty} (C^{(2)}(p) sh(p\varphi) + D^{(2)}(p) ch(p\varphi)) \sin p t dp; \quad (t; \varphi) \in \{-\varphi_2 \leq \varphi \leq 0; t \leq 0\};$$

$$\Phi_{III} = \sum_{k=1}^{\infty} (A_k^{(3)} \sinh \lambda_k t + B_k^{(3)} \cosh \lambda_k t) \sin \lambda_k \varphi + \sum_{k=1}^{\infty} (C_k^{(3)} sh \beta_k \varphi + D_k^{(3)} ch \beta_k \varphi) \sin \beta_k t; \quad (t; \varphi) \in \{-\varphi_2 \leq \varphi \leq 0; 0 \leq t \leq t_1\}$$

$$\text{где } \alpha_k = \frac{2k-1}{2\varphi_1} \pi; \lambda_k = \frac{2k-1}{2\varphi_2} \pi; \beta_k = \frac{k\pi}{t_1}.$$

Функции  $\Phi_i$  выбираются таким образом, чтобы удовлетворять дифференциальному уравнению (2). Неопределенные коэффициенты

$$A_k^{(1)}, A_k^{(2)}, A_k^{(3)}, B_k^{(3)}, C^{(1)}(p), C^{(2)}(p), C_k^{(3)}, D^{(1)}(p), D^{(2)}(p), D_k^{(3)}$$

находятся из условий (3), которые приводят к следующей системе смешанного типа:

$$X(p) = \frac{p}{\varphi_2 \Delta_1(p)} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{Y_k}{\lambda_k^2 + p^2}; \quad Y_k = \frac{\lambda_k}{\pi \Delta_2(k)} \int_0^{\infty} \frac{X(p) dp}{\lambda_k^2 + p^2} - Q_k \quad (k = 1, 2, 3, \dots; p > 0). \quad (4)$$

$$\text{где } t_1 = \ln \frac{b}{a}, \lambda_k = \frac{2k-1}{2\varphi_2} \pi, Q_k = \frac{\lambda_k}{\Delta_2(k)(\lambda_k^2 - 4)} \left(1 - \frac{2}{\lambda_k} (cth \lambda_k t_1 - \frac{e^{2t_1}}{sh \lambda_k t_1})\right);$$

$$\Delta_1(p) = \frac{1}{2} (th p \varphi_1 + th p \varphi_2); \quad \Delta_2(k) = \frac{1}{2} (1 + cth \lambda_k t_1).$$

Решение системы (4) позволяет определить неопределенные коэффициенты по формулам:

$$D^{(2)}(p) = \frac{a^2}{\pi p} (X(p) - 1); \quad A_k^{(2)} = \frac{a^2}{\varphi_2 \lambda_k} (Y_k - 1); \quad C^{(2)}(p) = th p \varphi_2 D^{(2)}(p);$$

$$B_k^{(3)} = A_k^{(2)}; \quad A_k^{(3)} = -\frac{b^2}{\lambda_k \varphi_2 sh \lambda_k t_1} - A_k^{(2)} cth \lambda_k t_1; \quad D^{(1)}(p) = D^{(2)}(p); \quad C^{(1)}(p) = -th p \varphi_1 D^{(2)}(p)$$

$$A_k^{(1)} = \frac{a^2}{\alpha_k \varphi_1}, \quad D_k^{(3)} = \frac{a^2 \beta_k}{t_1 (4 + \beta_k^2)} (1 + (-1)^{k+1} e^{2t_1}); \quad C_k^{(3)} = \frac{a^2 \beta_k th \beta_k \varphi_2}{t_1 (4 + \beta_k^2)} (1 + (-1)^{k+1} e^{2t_1}).$$

Для многих краевых задач теории упругости построение точного решения оказывается возможным благодаря исследованию и решению соответствующих бесконечных систем линейных уравнений смешанного типа, связывающих функции дискретного и непрерывного аргументов:

$$x(t) = \sum_{n=1}^{\infty} a(t, n)y_n + b(t); \quad y_k = \int_0^{\infty} \alpha(k, t)x(t)dt + \beta_k, \quad (k = 1, 2, 3, \dots; t \geq 0). \quad (5)$$

Условия регулярности для этих систем можно записать следующим образом:

$$\sum_{n=1}^{\infty} |a(t, n)| = 1 - \varphi(t) < 1; \quad \int_0^{\infty} |\alpha(k, t)| dt = 1 - \psi_k < 1, \quad (k = 1, 2, 3, \dots; t \geq 0). \quad (6)$$

Ответить на вопрос о существовании главного решения (решения к которому сходится процесс итераций с нулевым начальным приближением) позволяет следующая теорема, являющаяся очевидным обобщением результатов [3].

**Теорема 1.** Если  $\exists K > 0: |b(t)| \leq K\varphi(t), |\beta_k| \leq K\psi_k, (k = 1, 2, 3, \dots; t \geq 0)$ , то существует  $\hat{x}(t), \hat{y}_k$  – ограниченное главное решение регулярной системы смешанного типа (5), причем  $|\hat{x}(t)| \leq K, |\hat{y}_k| \leq K$ .

Если удается доказать существование главного решения для бесконечной системы вида (5), то для численной оценки ее решения, как правило, используется метод редукции, при котором все неизвестные, начиная с некоторого номера  $N$  полагаются равными нулю, а все уравнения начиная с  $N$ -го, отбрасываются.

Знание асимптотических свойств неизвестных позволяет во многих случаях существенно улучшить точность численного решения бесконечной системы. Более того, без знания асимптотики решения бесконечной системы невозможно учесть особенности напряженного состояния, обусловленные наличием угловых точек.

В [1] доказывается, что система (4) вполне регулярна, а значит, имеет единственное ограниченное решение. Однако, при использовании метода редукции происходит обязательное усечение полного вектора неизвестных, которые, как будет показано ниже, убывают достаточно медленно, что приводит к возникновению погрешности. В связи с этим встает вопрос об исследовании асимптотических свойств системы (4).

Ниже предлагается теорема, которая позволяет исследовать асимптотику решения (4):

**Теорема 2.** Если для бесконечной системы вида (5), удовлетворяющей условиям вырожденной регулярности

$$\sum_{n=1}^{\infty} |a(t, n)| = 1 - \rho(t) \leq 1; \quad \int_0^{\infty} |\alpha(k, t)| dt = 1 - \psi_k \leq 1, \quad (k = 1, 2, 3, \dots; t \geq 0) \quad (7)$$

с положительными коэффициентами и неотрицательными свободными членами существует единственное ограниченное решение, и выполняются следующие два условия

a)  $\exists L \geq l > 0: lr_n \leq a(t, n)q(t) \leq Lr_n, (t > n); \quad l\tau(t) \leq \alpha(k, t)\xi_k \leq L\tau(t), (k > t)$ .

Здесь  $q(t)$  и  $\{\xi_k\}$  таковы, что  $q(t)\rho(t) \leq A, q(t)b(t) \leq A, \xi_k\psi_k \leq A, \xi_k\beta_k \leq A$  ( $A > 0$ );

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^N r_n = \infty, \quad \lim_{N \rightarrow \infty} \int_0^N \tau(t)dt = \infty, \quad r_{N+1} = o\left(\sum_{n=1}^N r_n\right), \quad N \rightarrow \infty;$$

$$6) \frac{\sum_{n=1}^{k-1} r_n}{\int_0^k \tau(t)dt} = O\left(\frac{\inf_{t>k} q(t)}{\xi_k}\right), \quad k \rightarrow \infty,$$

то для системы (5) единственное ограниченное решение является главным, и имеет общий ненулевой предел.

Заметим, что представленная теорема полностью созвучна с аналогичным результатом из теории бесконечных алгебраических уравнений [4].

Чтобы привести систему (4) к виду, в котором бы работал достаточный признак существования у решения системы общего ненулевого предела (теорема 2), сделаем следующую замену переменных:  $x(z) = -X(z)z^{\frac{2}{3}}$ ;  $y_k = -Y_k z^{\frac{2}{k}}$  ( $k = 1, 2, 3, \dots; z > 0$ ).

Относительно неизвестных  $x(z)$  и  $y_k$  получаем бесконечную систему:

$$x(z) = \frac{z^{5/3}}{\varphi_2 \Delta_1(z)} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\lambda_k^{-2/3} y_k}{\lambda_k^2 + z^2}, \quad y_k = \frac{\lambda_k^{5/3}}{\pi \Delta_2(k)} \int_0^{\infty} \frac{z^{-2/3} x(z)}{\lambda_k^2 + z^2} dz + \lambda_k^{2/3} Q_k. \quad (8)$$

( $k = 1, 2, 3, \dots; z > 0$ )

Для оценки регулярности (6) системы (8) используется формула суммирования Эйлера-Маклорена:

$$\sum_{k=N}^{\infty} f(k) = \int_N^{\infty} f(x) dx + \frac{1}{2} f(N) - \left( \frac{B_2}{2!} f'(N) + \frac{B_4}{4!} f''(N) + \frac{B_6}{6!} f^{(6)}(N) + \dots + \frac{B_{2s}}{(2s)!} f^{(s)}(N) \right) + r_s(N),$$

где  $B_k$  – числа Бернулли ( $B_0 = 1; B_2 = \frac{1}{6}; B_4 = -\frac{1}{30}; B_6 = \frac{1}{42}; B_8 = -\frac{1}{30}; B_{10} = \frac{5}{66}; \dots$ );

$B_k(x)$  – многочлены Бернулли. Функция  $f(x)$  предполагается дифференцируемой  $s$  раз, а остаточный член формулы  $r_s(N)$  равен

$$r_s(N) = \sum_{m=N}^{\infty} \int_m^{m+1} \frac{B_{2s+1}(x - N - m)}{(2s+1)!} f^{(2s+1)}(x) dx,$$

и допускает оценку

$$|r_s(N)| \leq \frac{B_{2s+1}}{(2s+1)!} \int_N^{\infty} |f(x)|^{(2s+1)} dx.$$

Тогда оценка регулярности имеет вид

$$\frac{z^{5/3}}{\varphi_2 \Delta_1(z)} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\lambda_k^{-2/3} y_k}{\lambda_k^2 + z^2} = 1 - \rho(z) \leq 1, \quad \frac{\lambda_k^{5/3}}{\pi \Delta_2(k)} \int_0^{\infty} \frac{z^{-2/3} x(z)}{\lambda_k^2 + z^2} dz = 1 - \psi(k) \leq 1. \quad (9)$$

( $k = 1, 2, 3, \dots; z > 0$ )

Здесь

$$\begin{aligned} \rho(z) &= \frac{1}{2\pi \Delta_1(z)} \left( \operatorname{arctg} \left( 2 \left( \frac{\lambda_N}{z} \right)^{1/3} - \sqrt{3} \right) + \operatorname{arctg} \left( 2 \left( \frac{\lambda_N}{z} \right)^{1/3} + \sqrt{3} \right) + 2 \operatorname{arctg} \left( \left( \frac{\lambda_N}{z} \right)^{1/3} \right) \right) - \\ &\quad - \frac{\sqrt{3}}{4} \ln \frac{\lambda_N^{2/3} - \sqrt{3} \lambda_N^{1/3} z^{1/3} + z^{2/3}}{\lambda_N^{2/3} + \sqrt{3} \lambda_N^{1/3} z^{1/3} + z^{2/3}} - \frac{z^{5/3}}{\varphi_2 \Delta_1(z)} \left( \sum_{k=1}^{N-1} \frac{\lambda_k^{-2/3}}{\lambda_k^2 + z^2} - \frac{1}{\lambda_k^2 + z^2} \left( \frac{\lambda_N^{-2/3}}{2} + \frac{\pi \lambda_N^{-5/3}}{18 \varphi_2} + \frac{\pi \lambda_N^{1/3}}{6 \varphi_2 (\lambda_N^2 + z^2)} \right) \right) + \varepsilon_N(z), \\ \psi(k) &= \frac{e^{-\lambda_k t_1}}{2 \Delta_2(k) \operatorname{sh} \lambda_k t_1}. \end{aligned}$$

Для остаточного члена формулы Эйлера-Маклорена найдена следующая оценка:

$$|\varepsilon_N(z)| \leq \frac{\pi^2 \lambda_N^{-11/3}}{12 \varphi_2^3} \frac{z^{5/3}}{(\lambda_N^2 + z^2)}.$$

Таким образом, согласно неравенствам (9) бесконечная система (8) является регулярной, но не вполне регулярной.

Рассмотрим вопрос о существовании для системы (8) главного решения. Так как

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{\lambda_k^{2/3} Q_k}{\psi_k} = +\infty,$$

то условие теоремы 1 не выполняется, и доказать существование главного решения для системы (8) оказывается возможным, благодаря следующему утверждению:

**Теорема 3.** Если свободные члены парной смешанной системы (5), удовлетворяющей условиям вырожденной регулярности (7), допускают оценку

$$|b(t)| \leq A \sum_{n=1}^{\infty} |a(t, n)| \psi_n, \quad |\beta_k| \leq A \int_0^{\infty} |\alpha(k, t)| |\varphi(t)| dt \quad (A > 0; k = 1, 2, 3, \dots; t > 0),$$

то существует главное решение  $\hat{x}(t), \hat{y}_k$  системы, допускающее оценку

$$|\hat{x}(t)| \leq A(1 - \varphi(t)), \quad |\hat{y}_k| \leq A(1 - \psi_k).$$

Доказательство данной теоремы аналогично доказательству подобного утверждения для бесконечных систем линейных алгебраических уравнений [3], и является следствием того, что при выполнении условия теоремы 3 для системы (5) существует мажорантная система

$$X(t) = \sum_{n=1}^{\infty} |a(t,n)| Y_n + A \sum_{n=1}^{\infty} |a(t,n)| \psi_n, \quad Y_k = \int_0^{\infty} |\alpha(k,t)| X(t) dt + A \int_0^{\infty} |\alpha(k,t)| \varphi(t) dt$$

$$(t > 0, k = 1, 2, 3\dots)$$

с неотрицательным решением  $X(t) = A(1 - \varphi(t)); Y_k = A(1 - \psi_k)$ .

Проверим для системы (8) выполнение условий теоремы 3, положив  $q(z) = z^{1/3}; \xi_k = \lambda_k^{1/3}$ . Тогда для условия (а)

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \xi_k \psi_k = 0; \lim_{k \rightarrow \infty} \xi_k Q_k \lambda_k^{2/3} = 1; \lim_{z \rightarrow \infty} q(z) \rho(z) = \gamma.$$

Значит, в силу теоремы об ограниченности последовательности (функции) имеющей предел, получаем, что условия на  $\xi_k; q(z)$  выполняются.

$$\text{При } z > k \geq 1: \frac{\lambda_k^{-2/3}}{\varphi_2 \Delta_1(z)} \cdot \frac{z^2}{z^2 + \lambda_k^2} \leq \frac{\lambda_k^{-2/3}}{\varphi_2 \Delta_1(1)};$$

$$\frac{\lambda_k^{-2/3}}{\varphi_2 \Delta_1(z)} \cdot \frac{z^2}{z^2 + k^2} \geq \frac{\lambda_k^{-2/3}}{\varphi_2} \cdot \frac{k^2}{k^2 + \lambda_k^2} = \frac{\lambda_k^{-2/3}}{\varphi_2} \cdot \frac{1}{1 + (\frac{\lambda_k}{k})^2} \geq \frac{\lambda_k^{-2/3}}{\varphi_2 (1 + (\frac{\pi}{\varphi_2})^2)}.$$

$$\text{При } k > z: \quad \frac{z^{-2/3}}{\pi \Delta_2(k)} \cdot \frac{\lambda_k^2}{z^2 + \lambda_k^2} \leq \frac{z^{-2/3}}{\pi};$$

$$\frac{z^{-2/3}}{\pi \Delta_2(k)} \cdot \frac{\lambda_k^2}{z^2 + \lambda_k^2} \geq \frac{z^{-2/3}}{\pi \Delta_2(1)} \cdot \frac{1}{1 + (\frac{k}{\lambda_k})^2} \geq \frac{z^{-2/3}}{\pi \Delta_2(1) (1 + (\frac{2\varphi_2}{\pi})^2)}.$$

Таким образом,

$$r_k = \lambda_k^{-2/3}; \quad \tau(z) = z^{-2/3}; \quad L = \max \left\{ \frac{1}{\pi}, \frac{1}{\varphi_2 \Delta_1(1)} \right\}; \quad l = \min \left\{ \frac{\varphi_2}{\varphi_2^2 + \pi^2}, \frac{\pi}{\Delta_2(1)(\pi^2 + 4\varphi_2^2)} \right\}.$$

При этом бесконечная система (8) имеет единственное ограниченное решение. Значит, для ее решения в силу теоремы 2 существует общий ненулевой предел:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} y_k = \lim_{z \rightarrow \infty} x(z) = a_0 > 0. \quad (10)$$

### Расчет

Функции  $\Phi_i(t, \varphi)$  ( $i = I, II, III$ ) после подстановки коэффициентов

$$A_k^{(i)}, B_k^{(3)}, C_k^{(I)}(p), C_k^{(3)}, D_k^{(I)}(p), D_k^{(3)}, (i = 1, 2, 3; l = 1, 2),$$

выраженных через  $y_k$  и  $x(z)$ , принимают следующий вид:

$$\Phi_1(t, \varphi) = \frac{a^2}{2} - \frac{a^2}{\pi} \int_0^{\infty} x(p) p^{-5/3} \frac{ch(p(\varphi_1 - \varphi))}{ch(p\varphi_1)} \sin ptdp, \quad (\varphi, t) \in \{0 \leq \varphi \leq \varphi_1; t \leq 0\}$$

$$\Phi_2(t, \varphi) = \frac{a^2}{2} - \frac{a^2}{\pi} \int_0^{\infty} x(p) p^{-5/3} \frac{ch(p(\varphi_2 + \varphi))}{ch(p\varphi_2)} \sin ptdp - \frac{a^2}{\varphi_2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{y_k e^{\lambda_k t}}{\lambda_k^{5/3}} \sin \lambda_k \varphi, \quad (\varphi, t) \in \{-\varphi_2 \leq \varphi \leq 0; t \leq 0\}$$

$$\Phi_3(t, \varphi) = \frac{a^2}{2} + \frac{b^2 - a^2}{2t_1} t - \frac{a^2}{\varphi_2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{y_k sh \lambda_k (t_1 - t)}{\lambda_k^{5/3} sh \lambda_k t_1} \sin \lambda_k \varphi - \frac{4a^2}{t_1} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1 + (-1)^{k+1} e^{2t_1}}{\beta_k (\beta_k^2 + 4)} \frac{ch \beta_k (\varphi_2 + \varphi)}{ch \beta_k \varphi_2} \sin \beta_k t$$

$$(\varphi, t) \in \{-\varphi_2 \leq \varphi \leq 0; 0 \leq t \leq t_1\}$$

Используя формулы для определения касательных напряжений, получаем:  
в области сечения I  $(\varphi, t) \in \{0 \leq \varphi \leq \varphi_1; t \leq 0\}$

$$\tau_{rz}^I = \frac{G \theta a e^{-t}}{\pi} \int_0^{\infty} x(p) p^{-2/3} \frac{sh(p(\varphi_1 - \varphi))}{ch(p\varphi_1)} \sin ptdp, \quad \tau_{\varphi z}^I = G \theta a e^t + \frac{G \theta a e^{-t}}{\pi} \int_0^{\infty} x(p) p^{-2/3} \frac{ch(p(\varphi_1 - \varphi))}{ch(p\varphi_1)} \cos ptdp;$$

в области сечения II  $(\varphi, t) \in \{-\varphi_2 \leq \varphi \leq 0; t \leq 0\}$

$$\tau_{rz}^{II} = -G\theta ae^{-t} \left( \frac{1}{\pi} \int_0^\infty x(p) p^{-2/3} \frac{\operatorname{sh}(p(\varphi_2 + \varphi))}{\operatorname{ch}(p\varphi_2)} \sin ptdp + \frac{1}{\varphi_2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{y_k e^{\lambda_k t}}{\lambda_k^{2/3}} \cos \lambda_k \varphi \right),$$

$$\tau_{\varphi z}^{II} = G\theta ae^{-t} \left( \frac{1}{\pi} \int_0^\infty x(p) p^{-2/3} \frac{\operatorname{ch}(p(\varphi_2 + \varphi))}{\operatorname{ch}(p\varphi_2)} \cos ptdp + \frac{1}{\varphi_2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{y_k e^{\lambda_k t}}{\lambda_k^{2/3}} \sin \lambda_k \varphi + e^{2t} \right),$$

в области сечения III  $(\varphi, t) \in \{-\varphi_2 \leq \varphi \leq 0; 0 \leq t \leq t_1\}$

$$\tau_{rz}^{III} = -G\theta ae^{-t} \left( \frac{1}{\varphi_2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{y_k \operatorname{sh} \lambda_k (t_1 - t)}{\lambda_k^{2/3} \operatorname{sh} \lambda_k t_1} \cos \lambda_k \varphi + \frac{4}{t_1} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1 + (-1)^{k+1} e^{2t_1}}{\beta_k^2 + 4} \frac{\operatorname{sh} \beta_k (\varphi_2 + \varphi)}{\operatorname{ch} \beta_k \varphi_2} \sin \beta_k t \right),$$

$$\tau_{\varphi z}^{III} = -G\theta ae^{-t} \left( \frac{e^{2t_1} - 1}{2t_1} + \frac{1}{\varphi_2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{y_k \operatorname{ch} \lambda_k (t_1 - t)}{\lambda_k^{2/3} \operatorname{sh} \lambda_k t_1} \sin \lambda_k \varphi - \frac{4}{t_1} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1 + (-1)^{k+1} e^{2t_1}}{\beta_k^2 + 4} \frac{\operatorname{ch} \beta_k (\varphi_2 + \varphi)}{\operatorname{ch} \beta_k \varphi_2} \cos \beta_k t - e^{2t} \right).$$

Касательные напряжения достигают своих максимальных значений на границе. Улучшим здесь их сходимость, используя (10). Тогда при достаточно больших  $N$  можно положить  $y_k \approx a_0 (k > N), x(z) \approx a_0 (z > N)$  с точностью до некоторой бесконечно малой, характеризующей стремление решения бесконечной системы к общему ненулевому пределу.

На границе сечения области I, используя известные значения интегралов, касательные напряжения можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\tau^I \varphi z}{G\theta a} \right|_{r=a} &= 1 + \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \frac{x(p) \operatorname{ch}((\varphi_1 - \varphi)p)}{p^{2/3} \operatorname{ch}(\varphi_1 p)} dp = 1 + \frac{1}{\pi} \int_0^N \frac{(x(p) - a_0) \operatorname{ch}((\varphi_1 - \varphi)p)}{p^{2/3} \operatorname{ch}(\varphi_1 p)} dp + \\ &+ \frac{a_0}{\pi} \frac{\Gamma(1/3)}{\sqrt[3]{4\varphi_1}} \left( \zeta\left(\frac{1}{3}; \frac{1}{4}\frac{\varphi}{\varphi_1}\right) + \zeta\left(\frac{1}{3}; \frac{1}{2} - \frac{1}{4}\frac{\varphi}{\varphi_1}\right) - \zeta\left(\frac{1}{3}; 1 - \frac{1}{4}\frac{\varphi}{\varphi_1}\right) - \zeta\left(\frac{1}{3}; \frac{1}{2} + \frac{1}{4}\frac{\varphi}{\varphi_1}\right) \right). \end{aligned}$$

где  $\zeta(a, x)$  – обобщенная дзета-функция Римана.

Известно, что при подходе к внутренней угловой точке ( $\varphi \rightarrow 0$ ) касательные напряжения  $\frac{\tau^I \varphi z}{G\theta a}$  имеют особенность порядка  $O(\varphi^{-1/3})$ . Используя решение бесконечной системы уравнений (8), можно точно описать поведение касательных напряжений вблизи внутренней угловой точки. Так для значений геометрических параметров  $\frac{b}{a} = 1,5; \varphi_2 = 170^\circ; \varphi_1 = 10^\circ$  имеем:  $\frac{\tau^I \varphi z}{G\theta a} = 0,8598 \cdot \varphi^{-1/3}$  ( $\varphi \rightarrow 0$ ) (рисунок 2).

Жесткость стержня вычисляется по формуле:

$$\begin{aligned} \frac{C}{Ga^4} &= \frac{\pi}{2} + \frac{\varphi_2}{2} \left( \left( \frac{b}{a} \right)^4 - 1 \right) - \frac{\varphi_2}{2t_1} \left( \left( \frac{b}{a} \right)^2 - 1 \right)^2 + 4 \cdot \left( \frac{2}{\pi} \int_0^\infty x(p) p^{-5/3} \Delta_1(p) dp \right) + \\ &+ \frac{2}{\varphi_2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{y_k}{\lambda_k^{5/3} (\lambda_k^2 - 4)} \left( \Delta_2(k) - \frac{e^{2t_1}}{2 \operatorname{sh} \lambda_k t_1} \right) - \frac{4}{t_1} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(1 + (-1)^{k+1} e^{2t_1})^2 t \operatorname{h} \beta_k \varphi_2}{\beta_k (\beta_k^2 + 4)^2}. \end{aligned}$$

При  $\frac{b}{a} = 1,5; \varphi_2 = 170^\circ; \varphi_1 = 10^\circ$  жесткость стержня равна:  $C = 1,32798Gb^4$ .

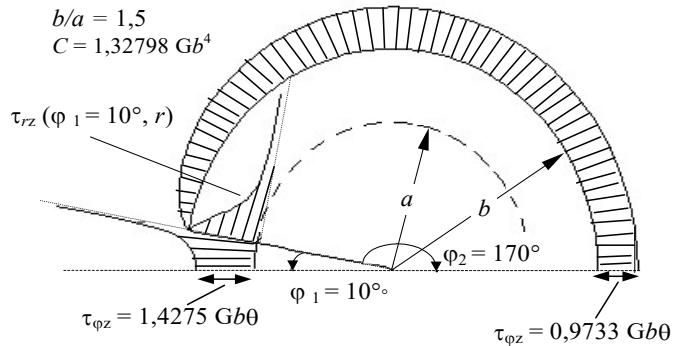
В [1] приводится значение жесткости стержня, полученное румынским математиком Маня методом вспомогательных функций для указанных выше значений геометрических параметров как равное  $C^* = 1,262Gb^4$ . Отличие составляет  $\delta = 4,97\%$ .

На границе областей II и III ряды и интегралы в выражениях касательных напряжений сходятся экспоненциально, что позволяет вычислить их без дополнительного улучшения сходимости. Ниже приводится эпюра касательных напряжений полученная для рассмотренных значений геометрических параметров (рисунок 2).

### Заключение

Таким образом, предложенный новый подход к исследованию бесконечных систем смешанного типа дает возможность получить уточненное решение, как известных

классических задач теории упругости, так и для новых актуальных задач механики твердого деформированного тела. Данные решения, прежде всего, будут востребованы при моделировании сложных технических систем в таких отраслях как строительство и машиностроение, а также в качестве эталонных при отладке численных методов.



**Рисунок 2 – Эпюра касательных напряжений (половина сечения)**

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамян Б. Л. Кручение упругих тел / Б.Л. Абрамян, Н.Х. Арутюнян – М.: Физматгиз, 1963. – 683 с.
2. Гринченко В.Т. Равновесие и установившиеся колебания упругих тел конечных размеров / В.Т. Гринченко – К.: Наук. думка, 1978. – 264 с.
3. Канторович Л. В. Приближенные методы высшего анализа / Л.В. Канторович, В.И.Крылов – М.-Л.: Гостехиздат, 1952. – 4-е изд. – 695 с.
4. Papkov S.O./ S.O. Papkov, A new method for analytical solution of in-plane free vibration of rectangular orthotropic plates based on the analysis of infinite systems// Journal of Sound and Vibration. - 369 (2016) – P.228 – 245.

**Папков Станислав Олегович**

ФГБОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь  
Доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой «Высшая математика»  
299046, г.Севастополь, ул. Университетская 33  
Тел. 7(978)006-23-30  
E-mail: SOPapkov@sevsu.ru

PAPKOV S.O.

## ANALYSIS OF FEATURES OF STRESS STATE DURING TORSION OF A SHAFT WITH SLOTS

**Abstract.** Based on new theorems on the existence and asymptotic behavior of solutions to infinite systems of mixed integral-algebraic type, a solution to the problem of torsion of a shaft with slots is constructed. The features of the stress state are studied, including at corner points.

**Keywords:** shaft torsion, stress function, infinite system, regularity, asymptotics.

## BIBLIOGRAPHY

1. Abramyan B. L. Krucheniye uprugikh tel / B.L. Abramyan, N.KH. Arutyunyan – M.: Fizmatgiz, 1963. – 683 s.
2. Grinchenko V.T. Ravnovesiy i ustanovivshiesya kolebaniya uprugikh tel konechnykh razmerov / V.T. Grinchenko – K.: Nauk. dumka, 1978. – 264 s.
3. Kantorovich L. V. Priblizhennyye metody vysshego analiza / L.V. Kantorovich, V.I.Krylov – M.-L.: Gostekhizdat, 1952. – 4-ye izd. – 695 s.
4. Papkov S.O./ S.O. Papkov, A new method for analytical solution of in-plane free vibration of rectangular orthotropic plates based on the analysis of infinite systems// Journal of Sound and Vibration. - 369 (2016) – P.228 – 245.

**Papkov Stanislav Olegovich**

«Sevastopol state university», Sevastopol  
DS, head of the department of mathematics  
299046,Sevastopol, Universitetskaya 33  
Ph.: 7(978) 006-23-30  
E-mail: SOPapkov@sevsu.ru

© Папков С.О., 2024

ДОЛОГЛОНЯН А.В., МАТВЕЕНКО В.Т., КЛИМЕНКО А.Г.

## ХАРАКТЕРИСТИКИ КОГЕНЕРАЦИОННЫХ МИКРОГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК ПРИ РАБОТЕ НА ЧАСТИЧНЫХ НАГРУЗКАХ

**Аннотация.** Предметом рассмотрения в статье является сравнительный анализ способов нагружения микрогазотурбинных установок (МГТУ) с целью исследования их характеристик на частичных нагрузках. Рассмотрены МГТУ на базе микрогазотурбинных двигателей (МГТД) с блокированной и свободной силовой турбиной (ССТ). Установлено, что машины с регенерацией показывают наибольшую эффективность во всем диапазоне нагружения при изотермическом способе нагружения при этом каждая конфигурация когенерационной МГТУ имеет экономичный режим нагружения отличный от номинального, что позволяет иметь запас мощности. Отмечено, что МГТУ со свободной силовой турбиной целесообразно применять в составе транспортных энергетических установок с редукторной передачей механической энергии нагрузке, а винтовой способ нагружения – при наличии регулируемого соплового аппарата (РСА) в ССТ уместно использовать для экономии ресурсных показателей двигателя на долевых нагрузках. Показано, что использование РСА в МГТД с неохлаждаемыми турбинами со ССТ позволяет задать любую программу регулирования – от винтового способа регулирования до изотермического.

**Ключевые слова:** микрогазотурбинная установка, регенерация теплоты, турбина перерасширения, турбокомпрессорный утилизатор, когенерация, частичные нагрузки, регулируемый сопловой аппарат.

### Введение

Электротеплоснабжение локальных (автономных) объектов (промышленных, сельскохозяйственных и транспортных) является важной народнохозяйственной задачей. Для решения этой задачи могут использоваться разные типы энергетических установок различной конфигурации.

Применение когенерационных технологий для обеспечения энергией локальных объектов возможно при децентрализации генерирующих мощностей. При этом тепловая и конструктивная схема когенерационной установки должна быть приспособлена к поставке требуемого количества и качества энергии (электрической и тепловой) для разных потребителей.

Для достижения гибкости в объемах поставки энергии газотурбинной энергетической установке приходится работать на частичных нагрузках. В зависимости от характера привода (привод движителя или механизма либо генератора) зависит и способ нагружения двигателя на частичных нагрузках (винтовой или генераторный).

Среди современных двигателей весомую долю получили газотурбинные двигатели. Их основные преимущества – высокая удельная мощность, экологичность, возможность работы на практически любых видах жидких и газообразных топлив, в том числе, и в замкнутых системах.

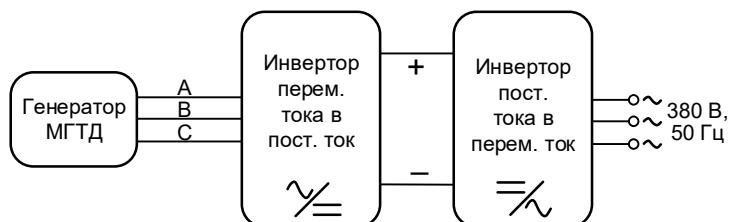
Для энергоснабжения локальных объектов распространенным вариантом является применение когенерационных микрогазотурбинных установок (МГТУ) мощностью от нескольких киловатт до 1 МВт, освоенных отечественным производителем.

Генератор МГТУ вырабатывает электрическую энергию переменного тока повышенной частоты, которая пропорциональна частоте вращения микротурбины (до 1500...2000 Гц). Для получения напряжения промышленной (50 Гц) или бортовой (400 Гц) частоты, требуется установка либо механического редуктора, как это делает компания Ingersoll-Rand, либо силового управляемого электронного преобразователя (СЭП) [1].

СЭП МГТУ строятся по схеме со звеном постоянного тока (рисунок 1). Высокочастотное многофазное (чаще трехфазное) нестабилизированное напряжение генератора сначала выпрямляется, а после с помощью инвертора преобразуется в трехфазное напряжение необходимого качества. Применение такой схемы позволяет легко обеспечить обмен энергией между генератором и нагрузкой. К шине постоянного тока может быть подключен как буферный накопитель электроэнергии, так и другие потребители постоянного тока.

По сравнению с механическим редуктором применение СЭП снижает потери и упрощает конструкцию машины. Поскольку генератор механически отделен от промышленной частоты, частоту вращения турбины можно изменять. Это приводит к повышению эффективности в области частичных нагрузок.

Целью данной работы является исследование термодинамических характеристик когенерационных МГТУ различных конфигураций на частичных нагрузках при постоянной максимальной температуре (изотермический способ нагружения) цикла ( $T_3$ ), что возможно при наличии СЭП, и сравнение их с другими способами нагружения.



*Рисунок 1 - Функциональная схема силового электронного преобразователя*

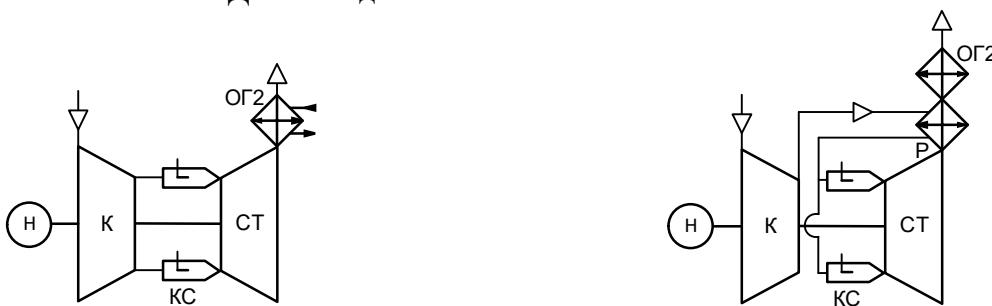
### Базовые схемы когенерационных МГТУ, работающих на органическом топливе

Микрогазотурбинные двигатели (МГТД) находят применение как для энергообеспечения локальных объектов, так и стационарных, технологических и транспортных подводных и надводных объектов. За основу базовой схемы МГТУ принят МГТД простого цикла (см. рисунок 2), который можно усложнить с целью увеличения КПД. При этом ГТД простого цикла является одновальным с блокированной турбиной для привода электрогенератора.

Усложнение ГТД простого цикла (ПЦ) осуществляется за счет:

- регенерации теплоты выхлопных газов в рабочем цикле двигателя;
- применения турбины перерасширения рабочего тела за силовой турбиной [2-5] с целью повышения мощности ГТД;
- применения комбинации предыдущих методов.

На рисунке 3 изображена схема МГТУ с регенерацией теплоты (ПЦ+Р), в которой по отношению к схеме МГТУ простого цикла добавлен теплообменник-регенератор для подогрева рабочего тела перед камерой сгорания за счет теплоты выхлопных газов двигателя, что позволяет повысить КПД самого двигателя.



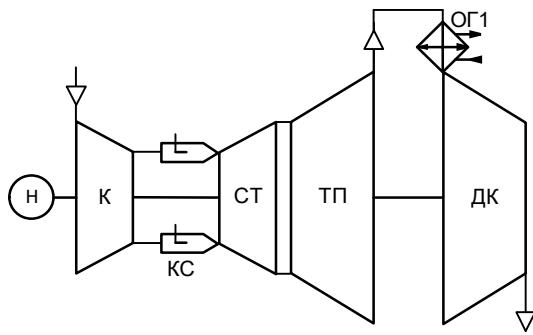
*Рисунок 2 – Схема когенерационной МГТУ простого цикла (ПЦ): К – компрессор; КС – камера сгорания; Т – турбина; ОГ2 – охладитель газов; Н – нагрузка*

*Рисунок 3 – Схема когенерационной МГТУ цикла с регенерацией (ПЦ+Р): Р – регенератор; остальные обозначения как на рисунке 1*

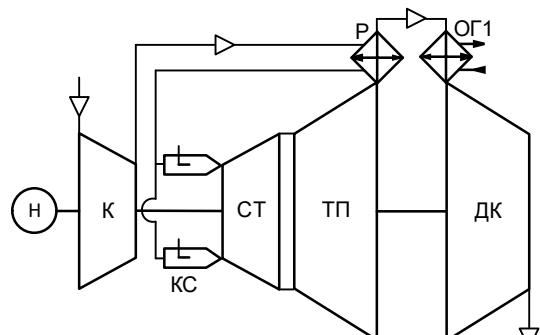
На рисунке 4 изображена схема микрогазотурбинной установки (МГТУ) с турбиной перерасширения. Турбина перерасширения, приводящая дожимающий компрессор (ДК) с охладителем газа (ОГ1) между ними, который выполняет роль котла-utiлизатора, образует турбокомпрессорный утилизатор (ТКУ). Посредством применения в рабочем цикле перерасширения рабочих газов за силовой турбиной увеличивается мощность двигателя при том же расходе топлива и, следовательно, повышается КПД двигателя.

Повышение КПД МГТД возможно также за счет глубокой утилизации теплоты

выхлопных газов двигателя, преобразовав часть ее в механическую работу. Такую задачу возможно решить за счет комбинации двух способов повышения экономичности МГТД, а именно, за силовой турбиной МГТД установить турбокомпрессорный утилизатор, а регенератор разместить между турбиной перерасширения и дожимающим компрессором. На рисунке 5 изображена схема МГТД с ТКУ и регенерацией теплоты. Охладитель газа ОГ1 обеспечивает понижение температуры газа перед ДК с целью снижения в нем работы сжатия, а также выполняет функцию котла-utiлизатора для обеспечения локального объекта теплотой.



**Рисунок 4 – Схема МГТУ с турбиной перерасширения (ПЦ+ТКУ): ТП – турбина; ОГ1 – охладитель газов; ДК – дожимающий компрессор; остальные обозначения как на рисунке 1**



**Рисунок 5 – Схема МГТУ с турбокомпрессорным утилизатором и регенерацией теплоты (ПЦ+ТКУ+Р): остальные обозначения как на рисунках 1-3**

### Методика и результаты исследования характеристик базовых МГТУ на номинальном режиме

Исследование характеристик рабочих циклов МГТУ при работе на номинальном режиме производилось с использованием физико-математических моделей и программного обеспечения, ранее апробированных при анализе параметров ГТУ, приведенных в работе [2].

В настоящее время в микрогазотурбинной технике достигнуты значительные успехи в области повышения эффективности ее элементов [6, 7]. В МГТУ необходимо учитывать конструктивные факторы, влияющие на аэродинамические характеристики компрессоров и турбин [6-8]. Так политропный КПД современных центробежных компрессоров находится в пределах  $\eta_k = 80...82\%$ , радиально-осевых турбин  $\eta_m = 85...86,5\%$ , а адиабатный КПД диагональных лопаточных машин  $88...90\%$ . В настоящее время применение доступных сплавов ЖС36 и ЖС40 позволяет иметь температуру газа перед турбиной до 1373 К включительно [9], при этом турбинная ступень высокого давления может быть неохлаждаемой. Для МГТУ характерно наличие теплообменных аппаратов, которые должны обеспечивать требуемые параметры рабочего тела в цикле, но при этом иметь оптимальные потери давления и, соответственно, габаритные размеры для МГТУ. Так, при применении регенератора, габариты которого существенно зависят от конструкции теплообменной матрицы, ее плотности и площади поверхности теплопередачи, для микротурбины оптимальная степень регенерации зависит от гидравлического сопротивления регенератора и давления рабочей среды по каждой из теплообменяющихся сторон [10]. Большинство мировых производителей МГТД («Микрогазотурбинные технологии», «Elliott», «Turbec», «Ingersoll R») используют степень регенерации 0,9 [11, 12].

Для моделирования установок, изображенных на рисунках 1-4, были приняты исходные данные, представленные в таблице 1.

Кроме того, для МГТУ принятые следующие ограничения по параметрам:

- максимальная степень регенерации – 0,9 (для обеспечения приемлемых температур перед регенератором со стороны газов);
- максимальная степень сжатия в одной ступени центробежного компрессора – 12 [12];
- максимальная степень сжатия в дожимающем компрессоре – 5 (диагональный компрессор);
- максимальная степень расширения в одной ступени турбины – 5 (радиально-осевая

турбина) и 6 (центро斯特ремительная турбина).

Результаты исследования характеристик МГТУ на базе двигателей с блокированной турбиной

Анализ характеристик циклов МГТУ производился при изменении степени повышения давления  $\pi_k$  в компрессоре двигателя, дожимающем компрессоре  $\pi_{ok}$ , степени регенерации  $\sigma$  и прочих равных фиксированных параметрах, характерных для микрогазотурбинных установок. Результаты такой оптимизации МГТУ, работающих по схемам, изображенным на рисунках 1-4 и исходных данных, приведенных в таблице 1 при максимальной температуре цикла  $T_3 = 1373$  К, представлены в таблице 2.

Таблица 1 – Исходные данные для моделирования базовых МГТУ

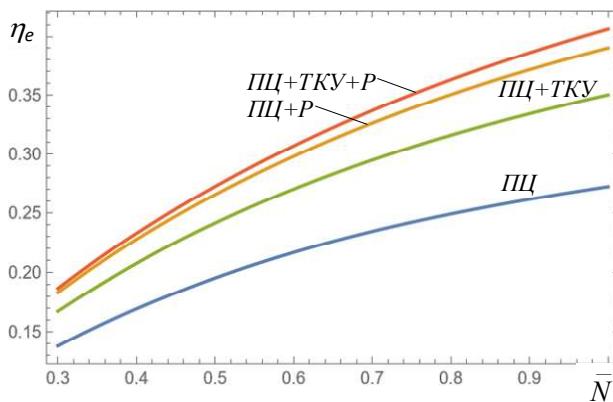
Наименование параметра	Ед. изм.	Численное значение
Политропный КПД турбины	–	0,865
Политропный КПД турбины компрессора	–	0,85
Политропный КПД компрессора	–	0,82
Политропный КПД второй ступени компрессора	–	0,8
Адиабатный КПД турбины перерасширения <sup>1</sup>	–	0,9
Адиабатный КПД дожимающего компрессора <sup>2</sup>	–	0,88
КПД камеры сгорания	–	0,99
КПД электрогенератора	–	0,96
Коэффициент восстановления давления в регенеративном теплообменнике со стороны газа для ПЦ+Р <sup>3</sup>	–	$\varepsilon_e = \frac{1-r}{2c_e r} \left( \sqrt{1+4c_e \frac{r}{1-r}} - 1 \right)$
Коэффициент восстановления давления в регенеративном теплообменнике со стороны газа для ПЦ+ТКУ+Р <sup>3</sup>	–	$\varepsilon_e = \frac{1}{2c_e (\varepsilon_{oel} \pi_{ok})^2} \frac{1-r}{r} \left( \sqrt{1+4c_e (\varepsilon_{oel} \pi_{ok})^2 \frac{r}{1-r}} - 1 \right)$
Коэффициент восстановления давления в регенеративном теплообменнике со стороны воздуха <sup>3</sup>	–	$\varepsilon_e = 1 - \frac{c_e}{\pi_k^2} \frac{r}{1-r}$
Коэффициент восстановления давления на входе в установку, $\varepsilon_{ax}$	–	0,96
Коэффициент восстановления давления в промежуточном охладителе воздуха, $\varepsilon_{ob}$	–	0,94
Коэффициент восстановления давления в КС, $\varepsilon_{kc}$	–	0,96
Коэффициент восстановления давления на выходе из установки, $\varepsilon_{eby}$	–	0,97
Коэффициент восстановления давления охладителей газа (ОГ1 и ОГ2), $\varepsilon_{oel1}, \varepsilon_{oel2}$	–	0,96
Температура газов на выходе из ОГ1 и ОГ2	К	323
Температура окружающего воздуха	К	288
Влажность окружающего воздуха	%	60
<b>Примечания</b>		
1, 2 – более высокие параметры компрессора и турбины связаны с масштабным эффектом в вакуумном цикле, поскольку давление рабочего тела за турбиной ниже атмосферного примерно в 2 раза, то соответственно во столько же раз размеры проточных частей компрессора и турбины больше, чем у компрессора и турбины в обычном цикле.		
3 – коэффициенты $c_e$ и $c_o$ определялись из параметров существующих прототипов [10].		

Таблица 2. Результаты оптимизации базовых когенерационных МГТУ на номинальном режиме с учетом ограничений

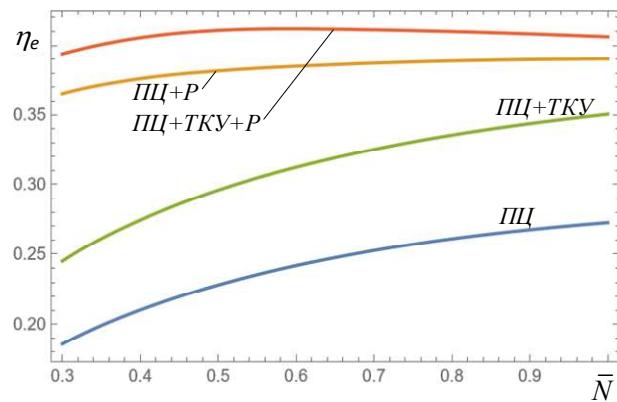
Наименование параметра	Ед. изм.	ПЦ	ПЦ+Р	ПЦ+ТКУ	ПЦ+ТКУ+Р
Эффективный КПД МГТУ	%	27,2	39,0	35,0	40,6
Температура газов на входе в охладитель газов	К	837	551	621	522
Оптимальная степень повышения давления в компрессоре	–	12	4,8	11,8	4,1
Оптимальная степень повышения давления в ДК	–	–	–	3,8	1,75
Оптимальная степень регенерации	–	–	0,9	–	0,9
Коэффициент восстановления давления газов в регенераторе	–	–	0,94	–	0,873
Удельная мощность на валу силовой турбины	кДж/кг	228	188	295	236
Удельная тепловая мощность	кДж/кг	544	232	309	204
КПД теплотехнический	%	92	87	72	77

## Результаты исследования характеристик МГТУ на базе двигателей с блокированной турбиной при частичных нагрузках

Анализ характеристик циклов МГТУ на частичных нагрузках производился на генераторном (при постоянном числе оборотов) и винтовом (мощность пропорциональна числу оборотов в третьей степени) режимах согласно методикам, предложенными в работах [3, 13, 14] и опробованных в работах [13-16]. Результаты исследования эффективности различных схем МГТУ на частичных нагрузках представлены на рисунках 6 и 7.



**Рисунок 6 – Зависимость КПД МГТУ, изображенных на рисунках 2-5, от относительной нагрузки при генераторном способе нагружения**



**Рисунок 7 – Зависимость КПД МГТУ, изображенных на рисунках 2-5, от относительной нагрузки при винтовом способе нагружения**

На рисунках 6 и 7 приняты следующие обозначения:  $\eta_e$  — КПД МГТУ;  $\bar{N} = N/N_0$  — относительная нагрузка, где  $N$  — текущая нагрузка МГТД, кДж/кг, а  $N_0$  — номинальная нагрузка МГТД, кДж/кг. Анализ рисунков 6 и 7 показывает, что эффективность схем МГТУ, изображенных на рисунках 2-5 и представленных в таблице 2 при винтовом способе нагружения выше, чем при генераторном. Рисунок 7 показывает, что эффективность схем МГТУ распределяется без изменений и на частичных генераторных нагрузках, при этом наименьшее снижение эффективности при уменьшении нагрузки обеспечивают схемы без регенерации (см. рисунки 2 и 4). Для винтового способа нагружения, наоборот, наименьшее снижение эффективности при уменьшении нагрузки обеспечивают схемы с регенерацией (см. рисунки 3 и 5). Это объясняется поведением регенераторов при различном способе нагружения. При генераторном способе нагружении происходит увеличение расхода рабочего тела через регенератор, что приводит к росту его и гидравлического сопротивления и снижению степени регенерации с понижением нагрузки. При винтовом способе нагружения происходят обратные процессы. Кроме того, определенный вклад вносят и другие гидравлические сопротивления (на входе в установку и выходе из нее, камеры сгорания, котлов-utiлизаторов) [17]. Особенно выделяется на этом фоне МГТУ на базе  $\Pi\bar{C}+TKU+P$ , для которой наблюдается рост КПД при снижении относительной нагрузки вплоть до  $\bar{N} = 0,56$ , что объясняется высоким гидравлическим сопротивлением регенератора (см. таблицу 2).

Изотермический способ нагружения ( $T_3 = \text{const}$ ) можно считать частным случаем количественного регулирования поскольку меняется не только расход газа, но и удельная работа цикла. Этот способ хорош тем, что не связан с характером изменения нагрузки, и поэтому является универсальным. Однако для реализации этого способа на физическом уровне недостаточно одного регулирующего фактора (топливного клапана), как это осуществляется при генераторном и винтовом способах нагружения, необходимо также использование регулируемого соплового аппарата (РСА) в силовой турбине, как второго регулирующего фактора. Применение РСА при разных программах регулирования позволяет эксплуатировать двигатель в широком диапазоне режимов без существенного снижения КПД и с минимальным расходом топлива. В большинстве случаев установка РСА предусматривается в машинах со свободной силовой турбиной, где обеспечивает существенные преимущества в эффективности двигателя сложного цикла при работе на частичных нагрузках по сравнению со статичным СА.

[18]. При использовании РСА влияние поворота лопаток в направляющем венце свободной силовой турбины на удельный расход топлива ГТД простого цикла незначительно.

Для микрогазотурбинных двигателей (особенно с регенерацией) разделение силовой турбины на турбину компрессора и свободную силовую приведет к снижению их размеров и соответственно КПД, что снизит эффективность установки в целом. Для блокированных турбин применение РСА не вносит весомых преимуществ в эффективности при работе на долевых нагрузках, и не создает существенных проблем [19, 20]. Кроме того, использование СЭП в составе МГТУ разрывает механическую связь силовой турбины и нагрузки, что позволяет блокированной турбине фактически работать в режиме свободной. Поэтому в расчеты эффективности блокированной силовой турбины МГТУ при работе на частичных нагрузках никаких дополнительных поправок на установку РСА не вносилось.

Результаты исследования эффективности схем когенерационных МГТУ, изображенных на рисунках 2-5, при изотермическом способе нагружения представлены на рисунке 8.

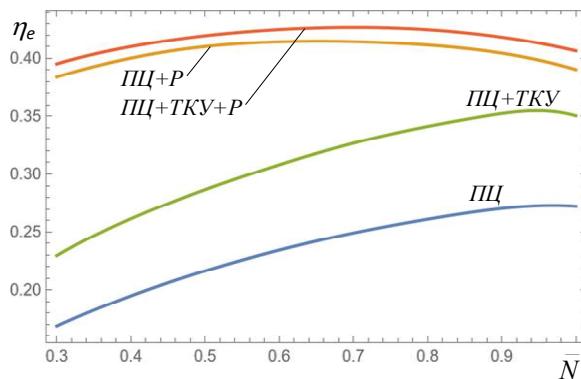


Рисунок 8 – Зависимость КПД МГТУ, изображенных на рисунках 2-5, от относительной нагрузки при изотермическом способе нагружения

Анализ рисунка 8 показывает, что при изотермическом способе регулирования каждая конфигурация МГТУ имеет экономичный режим нагружения отличный от номинального, что позволяет иметь запас мощности.

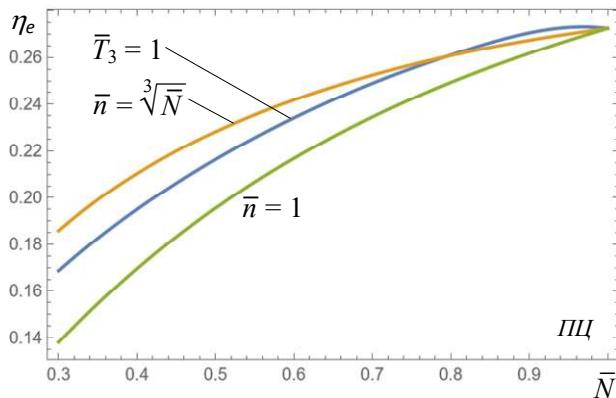


Рисунок 9 - Зависимость КПД МГТУ на базе ПЦ от относительной нагрузки при различных способах нагружения

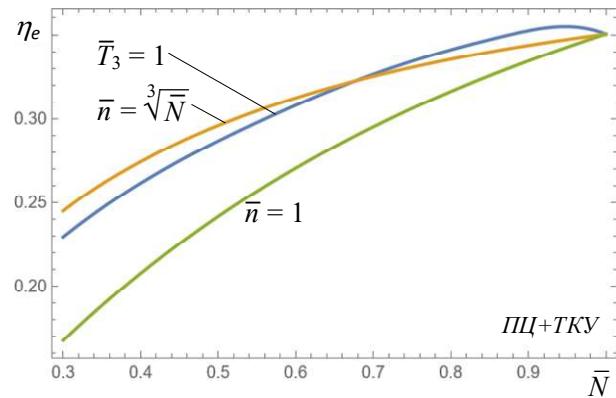


Рисунок 10 - Зависимость КПД МГТУ на базе ПЦ+ТКУ от относительной нагрузки при различных способах нагружения

Сравнение всех способов нагружения показывает, что генераторный способ нагружения наименее эффективен для всех конфигураций МГТУ, изображенных на рисунках 2-5. Машины с регенерацией (см. рисунки 3 и 5) показывают наибольшую эффективность во всем диапазоне нагрузления при изотермическом способе нагружения. В тоже время поведение машин без регенерации (см. рисунки 2 и 4) не так однозначно. Результаты исследования эффективности схем когенерационных МГТУ без регенерации при различных способах нагружения

представлены на рисунках 9 и 10. На рисунках 9 и 10 приняты следующие обозначения:  $\bar{n} = n/n_0$  – относительное число оборотов, где  $n$  – текущее число обратов МГТД, об/с; а  $n_0$  – номинальное число оборотов, об/с;  $\bar{T}_3 = T_3 / T_{30}$  – относительная максимальная температура цикла, где  $T_3$  – текущая максимальная температура цикла, К, а  $T_{30}$  – максимальная температура цикла на номинальном режиме, К. Из рисунков 9 и 10 видно, что при небольшом снижении нагрузки изотермический способ нагружения имеет преимущество перед винтовым, а при существенном – наоборот. Это происходит потому, что при  $T_3 = \text{const}$  для обеспечения должного снижения нагрузки требуется большее снижение общей степени расширения в турбинах (см. рисунок 11), чем при винтовом способе нагружения, когда  $T_3$  уменьшается вместе с нагрузкой. При небольшом снижении нагрузки, а следовательно, и расхода рабочего тела, эффективность элементов МГТУ снижается незначительно, а гидравлическое сопротивление, которое пропорционально квадрату расхода рабочего тела – значимо (см. рисунок 12), что и обеспечивает преимущество в эффективности для изотермического способа нагружения. При существенном снижении нагрузки большую роль играет эффективность компрессора и турбин, которая сильно зависит от расхода рабочего тела (числа оборотов), в то время как гидравлическое сопротивление газовоздушного тракта установки влияния уже практически не оказывает. Эти факторы обеспечивают преимущество в эффективности для винтового способа нагружения.

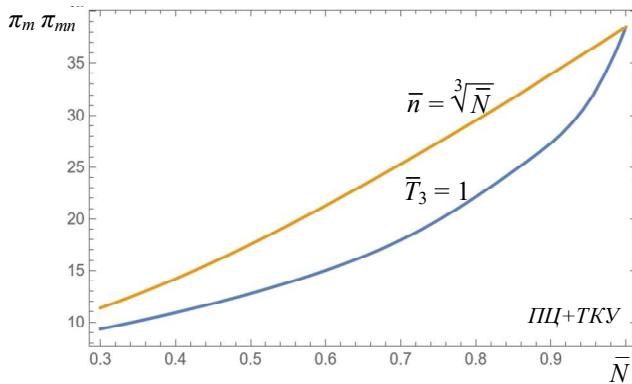


Рисунок 11 – Зависимость общей степени расширения в турбинах МГТУ на базе ПЦ+ТКУ от относительной нагрузки при различных способах нагружения

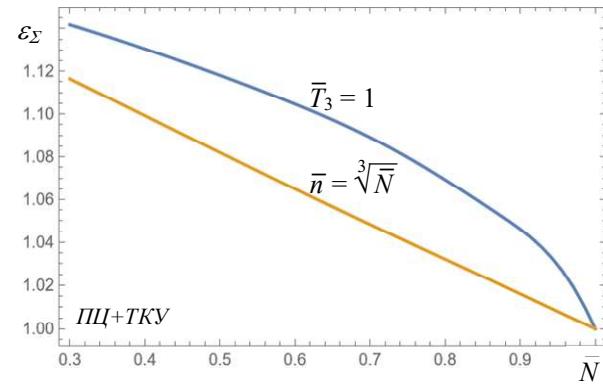


Рисунок 12 – Зависимость коэффициента восстановления давления газовоздушного тракта МГТУ на базе ПЦ+ТКУ от относительной нагрузки при различных способах нагружения

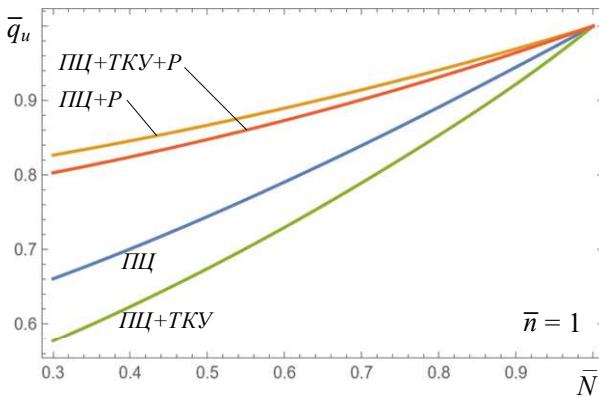


Рисунок 13 – Зависимость относительной тепловой мощности МГТУ, изображенных на рисунках 2-5, от относительной нагрузки при генераторном способе нагружения

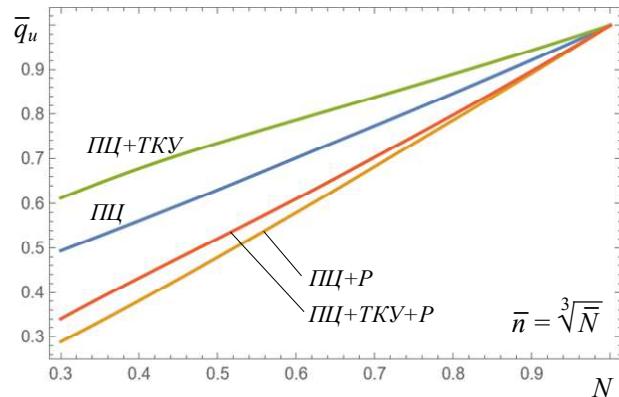


Рисунок 14 – Зависимость относительной тепловой мощности МГТУ, изображенных на рисунках 2-5, от относительной нагрузки при винтовом способе нагружения

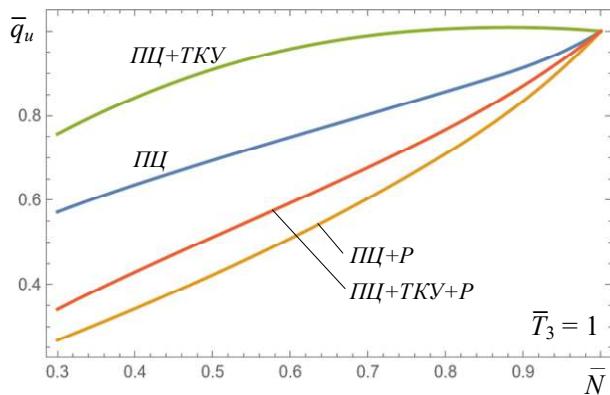


Рисунок 15 – Зависимость относительной тепловой мощности МГТУ, изображенных на рисунках 2-5, от относительной нагрузки при изотермическом способе нагружения

На рисунках 11 и 12 приняты следующие обозначения:  $\pi_m$  – степень расширения в силовых турбинах МГТД;  $\pi_{mn}$  – степень расширения в турбине перерасширения ТКУ;  $\varepsilon_\Sigma$  – коэффициент восстановления давления газовоздушного тракта установки.

Для когенерационных установок тепловая мощность не менее важна, чем механическая (электрическая). Результаты исследования относительной тепловой мощности когенерационных МГТУ при различных способах нагружения представлены на рисунках 13-15.

На рисунках 13-15 приняты следующие обозначения:  $\bar{q}_u = q_u / q_{u0}$  – относительная тепловая мощность, где  $q_u$  – текущее значение удельной тепловой мощности, переданной на теплоснабжение, кДж/кг;  $q_{u0}$  – значение удельной тепловой мощности, переданной на теплоснабжение наnomинальном режиме, кДж/кг. Анализ рисунков 13-15 показывает, что общим для всех способов нагружения является снижение  $q_u$  вместе с нагрузкой. Для генераторного способа нагружения, когда с понижением нагрузки возрастает расход рабочего тела и уменьшается  $T_3$ , наиболее интенсивно это происходит с машинами без регенерации, что приводит к наиболее существенному снижению  $\bar{q}_u$  (см. рисунок 13). Для винтового способа нагружения, когда с понижением нагрузки существенно уменьшается расход рабочего тела и незначительно  $T_3$ , ситуация с машинами без регенерации меняется на противоположную (см. рисунок 14). Для изотермического способа нагружения, когда с понижением нагрузки существенно уменьшается только расход рабочего тела,  $\bar{q}_u$  меняется аналогично винтовому способу нагружения, однако за счет поддержания  $T_3 = \text{const}$  это уменьшение не столь велико (см. рисунок 15). Более того, для МГТУ на базе ПЦ+ТКУ в диапазоне нагрузления от 70 до 100 %  $\bar{q}_u$  практически не меняется, что позволяет в этом диапазоне обеспечивать устойчивое теплоснабжение локального объекта.

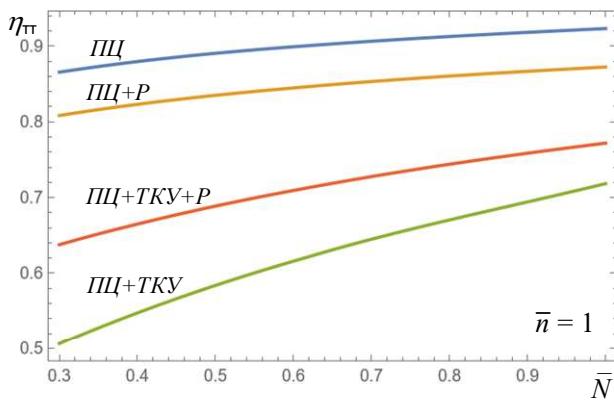


Рисунок 16 – Зависимость теплотехнического КПД МГТУ, изображенных на рисунках 2-5, от относительной нагрузки при генераторном способе нагружения

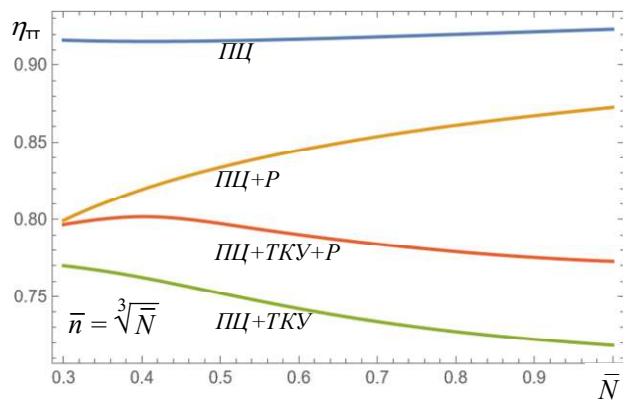
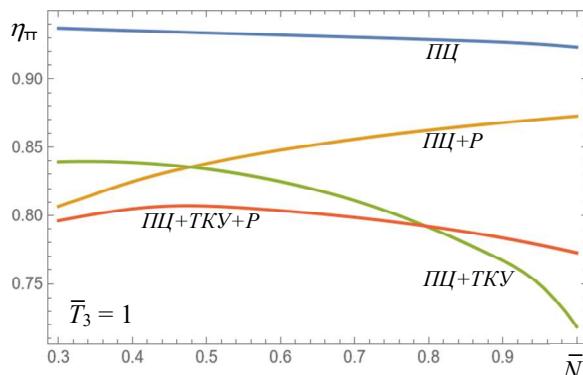


Рисунок 17 – Зависимость теплотехнического КПД МГТУ, изображенных на рисунках 2-5, от относительной нагрузки при винтовом способе нагружения

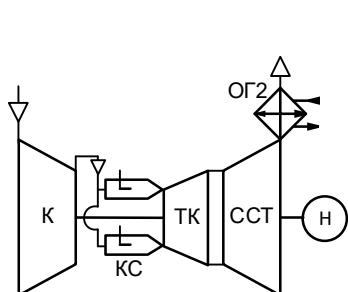
Общую эффективность когенерационных МГТУ можно оценить с помощью теплотехнического (общего) КПД. Результаты исследования теплотехнического КПД когенерационных МГТУ при различных способах нагружения представлены на рисунках 16-18.



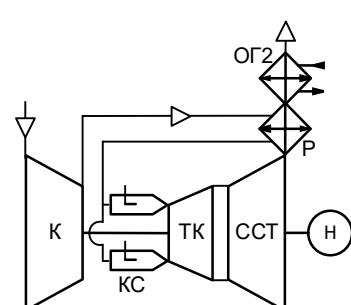
**Рисунок 18 – Зависимость теплотехнического КПД МГТУ, изображенных на рисунках 2-5, от относительной нагрузки при изотермическом способе нагружения**

На рисунках 16-18 приняты следующие обозначения:  $\eta_{tt} = \frac{N + q_u}{q}$  – теплотехнический КПД, где  $q$  – текущее значение удельной теплоты цикла, кДж/кг. Проведенный ранее анализ эффективного КПД и относительной теплоты, переданной на теплоснабжение, дает понимание зависимостям теплотехнического КПД от относительной нагрузки при различных способах нагружения. Однако, можно отметить, что теплотехнический КПД МГТУ на базе ПЦ+Р практически не зависит от способа нагружения, что объясняется перераспределением энергии цикла между тепловой и механической ввиду высокой степени регенерации. Также следует отметить, что установки, имеющие в своем составе ТКУ при винтовом и изотермическом способе нагружения имеют тенденцию к повышению  $\eta_{tt}$  при снижении нагрузки. Это связано с тем, что для МГТУ на базе ПЦ+ТКУ снижение расхода рабочего тела, в конечном итоге, приводит к росту температуры газов перед котлом-utiлизатором (ОГ1) и увеличивает долю теплоты в суммарном количестве энергии цикла и таким образом поднимает теплотехнический КПД. Особенно это заметно при изотермическом способе нагружения, поскольку данная машина не имеет регенератора. Для МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+Р снижение расхода рабочего тела, как было описано выше, приводит к существенному уменьшению суммарного гидравлического сопротивления газовоздушного тракта и повышению доли механической энергии в энергетическом балансе цикла.

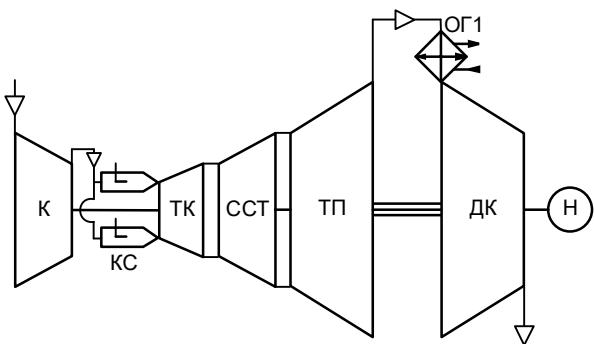
Результаты исследования характеристик МГТУ на базе двигателей со свободной силовой турбиной на номинальном режиме



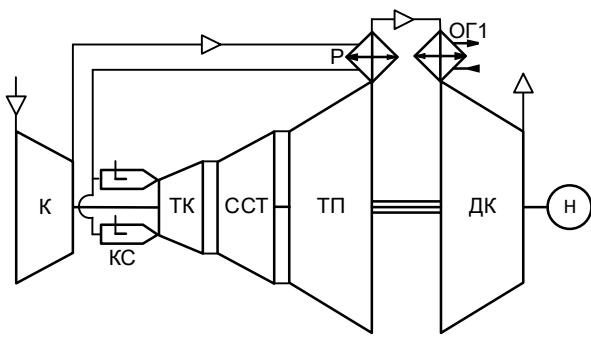
**Рисунок 19 – Схема когенерационной МГТУ ПЦ со ССТ: ТК – турбина компрессора, остальные обозначения как на рисунке 2**



**Рисунок 20 – Схема когенерационной МГТУ ПЦ+Р со ССТ: остальные обозначения как на рисунках 3, 19**



**Рисунок 21 – Схема когенерационной МГТУ ПЦ+ТКУ со ССТ:** остальные обозначения как на рисунках 4, 19



**Рисунок 22 – Схема когенерационной МГТУ ПЦ+ТКУ+Р со ССТ:** остальные обозначения как на рисунках 5, 19

Анализ характеристик циклов МГТУ на базе двигателей со свободной силовой турбиной (ССТ) производился при изменении степени повышения давления  $\pi_k$  в компрессоре двигателя, дожимающем компрессоре  $\pi_{dk}$ , степени регенерации  $\sigma$  и прочих равных фиксированных параметрах, характерных для микрогазотурбинных установок. Результаты такой оптимизации МГТУ, работающих по схемам, изображенным на рисунках 19-22 и исходных данных, приведенных в таблице 1 при максимальной температуре цикла  $T_3 = 1373$  К, представлены в таблице 3.

**Таблица 3 – Результаты оптимизации базовых когенерационных МГТУ на базе двигателей со ССТ на номинальном режиме с учетом ограничений**

Наименование параметра	Ед. изм.	ПЦ	ПЦ+Р	ПЦ+ТКУ	ПЦ+ТКУ+Р
Эффективный КПД МГТУ	%	26,4	37,2	34,5	39,2
Температура газов на входе в охладитель газов	К	843	560	628	533
Оптимальная степень повышения давления в компрессоре	–	12	5,1	11,6	4,3
Оптимальная степень повышения давления в ДК	–	–	–	3,8	1,9
Оптимальная степень регенерации	–	–	0,9	–	0,89
Коэффициент восстановления давления газов в регенераторе	–	–	0,94	–	0,87
Удельная мощность на валу силовой турбины	кДж/кг	221	180	291	226
Удельная тепловая мощность	кДж/кг	551	242	317	214
КПД теплотехнический	%	92	87	72	76

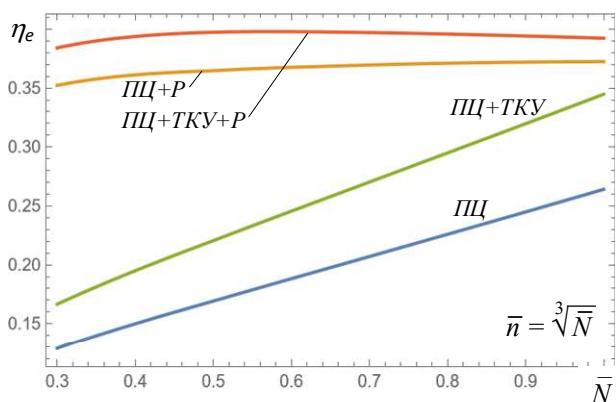
Сравнение таблиц 2 и 3 показало, что разделение силовой турбины на ТК и ССТ приведет к снижению их размеров и соответственно КПД, что снизит эффективность установки в целом, особенно это заметно для машин без ТКУ.

#### Результаты исследования характеристик МГТУ на базе двигателей со свободной силовой турбиной при частичных нагрузках

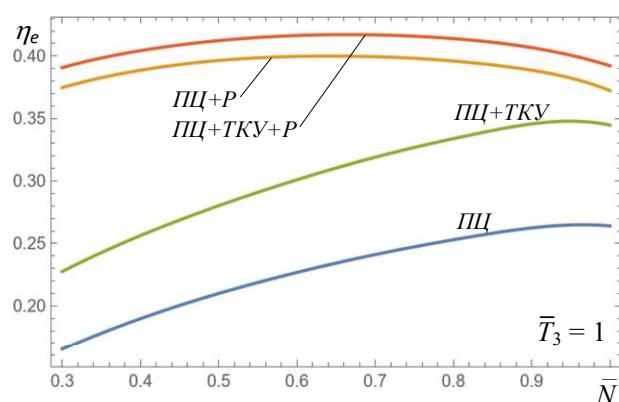
Анализ характеристик циклов МГТУ на частичных нагрузках производился на винтовом (мощность пропорциональна числу оборотов в третьей степени) и изотермическом режимах. Генераторный способ нагружения не рассматривался, поскольку для машин со ССТ он не имеет смысла. Результаты исследования эффективности различных схем МГТУ на базе двигателей со ССТ на частичных нагрузках представлены на рисунках 23 и 24.

Анализ рисунков 23 и 24 показывает, что характер поведения установок с регенерацией не сильно изменился по сравнению с МГТУ на базе двигателей с блокированными турбинами (см. рисунки 7 и 8), кроме пониженных КПД на номинальном режиме и, соответственно на частичных. Единственной «особенностью» рисунка 23 является практически линейная зависимость эффективности установок без регенерации от относительной нагрузки.

Применение РСА в свободной силовой турбине, как было сказано выше, позволяет поднять эффективность МГТУ на долевых нагрузках вплоть до изотермического способа нагружения.



**Рисунок 23 – Зависимость КПД МГТУ, изображенных на рисунках 19-22, от относительной нагрузки при винтовом способе нагружения**



**Рисунок 24 – Зависимость КПД МГТУ, изображенных на рисунках 19-22, от относительной нагрузки при изотермическом способе нагружения**

Расчет характеристик ГТУ с регенерацией теплоты и турбиной перерасширения производился по методике, предложенной в работах [21], с учетом применения РСА в силовой турбине.

В общем случае при расчете характеристик ГТД на частичных нагрузках применяется относительная степень повышения давления воздуха, определяемая по формуле:

$$y = \frac{\pi_k - 1}{\pi_{k0} - 1} = f(\bar{G}), \quad (1)$$

где  $\bar{G} = \frac{G}{G_0}$  – относительный расход воздуха;

$G$  – расход воздуха через компрессор на текущем режиме, кг/с;

$G_0$  – расход воздуха через компрессор наnomинальном режиме, кг/с.

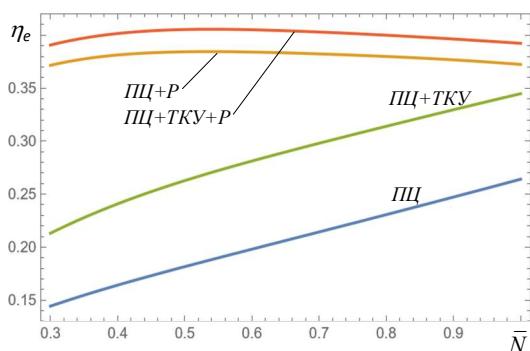
Для свободной силовой турбины с РСА формулу (1) можно записать в виде:

$$y = \frac{\pi_k - 1}{\pi_{k0} - 1} = [f(\bar{G})]^c, \quad (2)$$

то есть изменения характеристик ССТ будут производиться в зависимости от изменения относительного расхода воздуха, характеризующего работу двигателя на частичных нагрузках, а также параметра  $c$ , который характеризует раскрытие проточной части РСА.

Параметр  $c$  принимается таким образом, чтобы текущая начальная температура ( $T_3$ ) не превышала номинального значения ( $T_{30}$ ).

Результаты расчета промежуточного (между винтовым и изотермическим) способа нагружения представлены на рисунке 25.

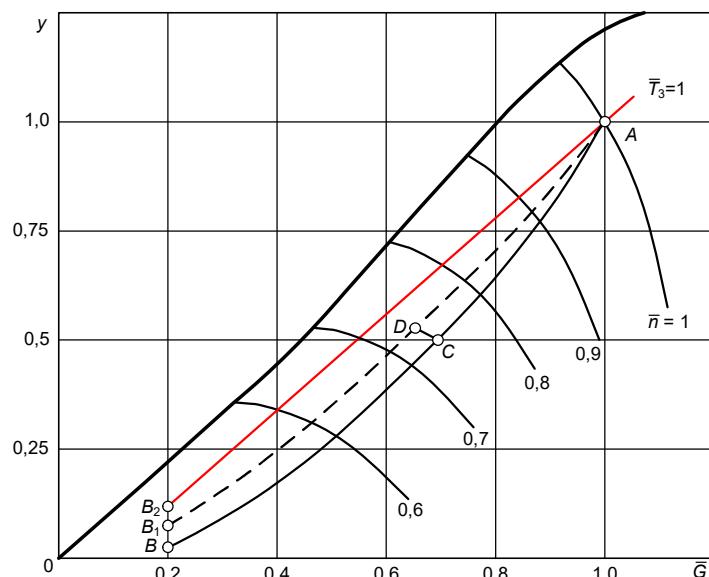


**Рисунок 25 – Зависимость КПД МГТУ, изображенных на рисунках 19-22, от относительной нагрузки при винтовом способе нагружения и использовании РСА**

Сравнение рисунков 23 и 25 показало, что применение РСА в ССТ позволило поднять

эффективность МГТУ с регенерацией теплоты по сравнению с винтовым способом нагружения. Поскольку на частичных нагрузках посредством РСА перераспределяется теплоперепад между турбинами, и изменяется расход газа через них, то способ регулирования приближается к количественному типу. На рисунке 26 показаны линии статических режимов турбины компрессора при изотермическом (линия  $AB_2$ ), винтовом (линия  $AB$ ) и промежуточном (линия  $AB_1$ ) способах нагружения. Таким образом использование РСА приближает винтовой способ регулирования к изотермическому. В общем случае для достижения с помощью РСА изотермического или другого способа нагружения параметр  $c \neq \text{const}$ , а является функцией относительного расхода, т.е.  $c = \varphi(\bar{G})$ .

Как и ожидалось, для МГТУ на базе ПЦ применение РСА не дает значимых преимуществ, что очевидно из сравнения рисунков 23 и 24, поскольку предельные возможности РСА для неохлаждаемых турбин – это изотермический способ нагружения. В тоже время для МГТУ на базе ПЦ+ТКУ отмечается ощутимый прирост эффективности на малых нагрузках по сравнению с винтовым способом нагружения. Это объясняется тем, что при использовании РСА при той же мощности снижается расход воздуха через компрессор и возрастают  $T_3$  и  $\pi_k$  (рисунок 26 линия CD). У МГТУ на базе ПЦ+ТКУ общая степень расширения в турбинах существенно выше (см. рисунок 11), чем в двигателе МГТУ на базе ПЦ, что обеспечивает больший прирост  $T_3$  и  $\pi_k$ , а следовательно, и ощутимое повышение эффективности на долевых нагрузках.



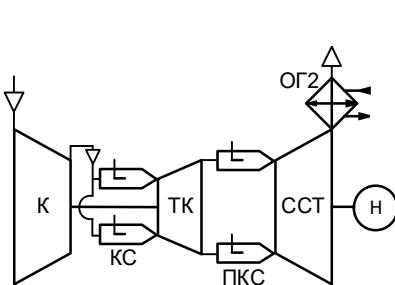
*Рисунок 26 – Линии статических рабочих режимов ТК на характеристике компрессора*

Таким образом МГТУ со свободной силовой турбиной целесообразно применять в составе транспортных энергетических установок с редукторной передачей механической энергии нагрузке. При этом винтовой способ нагружения при наличии РСА в ССТ предпочтительно использовать для экономии ресурсных показателей двигателя на долевых нагрузках.

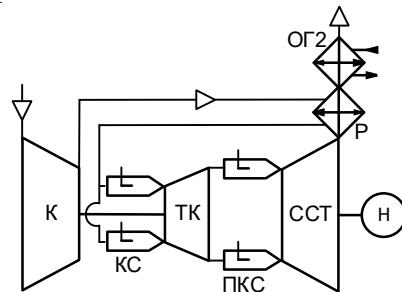
#### **Результаты исследования характеристик МГТУ на базе двигателей с промежуточным подогревом и свободной силовой турбиной на номинальном режиме**

МГТУ с промежуточным подогревом (ПП) рабочего тела, которые кроме повышенной удельной работы, обладают также и повышенной удельной теплотой, переданной на теплоснабжение, т.е. большим утилизационным потенциалом. Также они обладают более широкими возможностями регулирования производительности, поскольку добавляется дополнительный регулирующий фактор – температура перед свободной силовой турбиной. Кроме того, МГТД, включающие ТКУ, обладают повышенной эффективностью (см. таблицы 2-4) [22].

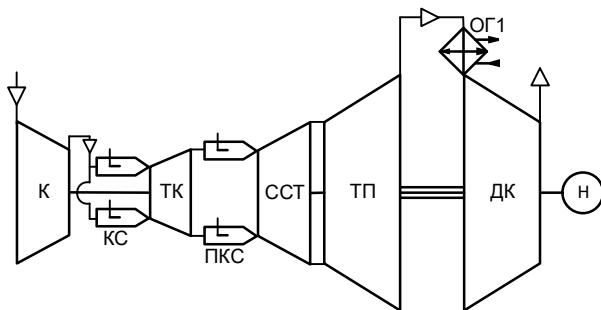
Анализ характеристик циклов МГТУ производился при изменении степени повышения давления  $\pi_k$  в компрессоре двигателя, дожимающем компрессоре  $\pi_{dk}$ , степени регенерации  $\sigma$  и прочих равных фиксированных параметрах, характерных для микрогазотурбинных установок. Результаты такой оптимизации МГТУ, работающих по схемам, изображенным на рисунках 27-30 и исходных данных, приведенных в таблице 1 при максимальной температуре цикла  $T_3 = 1373$  К и температурой после ПКС  $T_{31} = T_3$ , представлены в таблице 4.



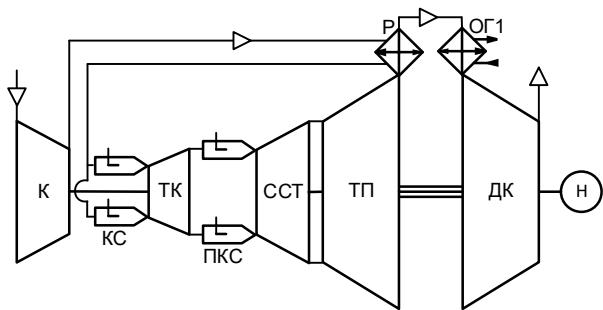
**Рисунок 27 – Схема когенерационной МГТУ на базе ПЦ+ПП: ПКС – промежуточная камера сгорания; остальные обозначения как на рисунке 19**



**Рисунок 28 – Схема когенерационной МГТУ на базе ПЦ+Р+ПП: остальные обозначения как на рисунках 20, 27**



**Рисунок 29 – Схема МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+ПП: остальные обозначения как на рисунках 21, 27**



**Рисунок 30 – Схема МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+Р+ПП: остальные обозначения как на рисунках 22, 27**

**Таблица 4 – Результаты оптимизации базовых когенерационных МГТУ с ПП и ССТ на номинальном режиме с учетом ограничений**

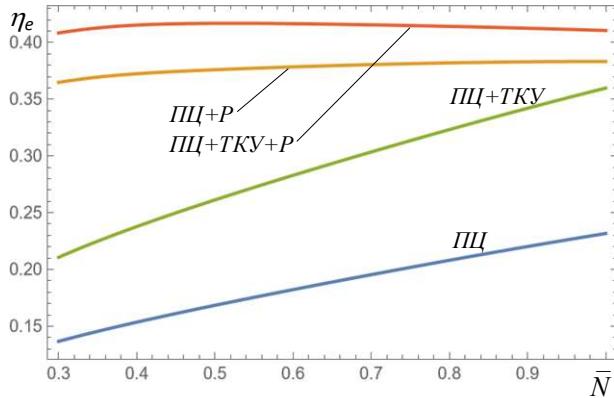
Наименование параметра	Ед. изм.	ПЦ	ПЦ+Р	ПЦ+ТКУ	ПЦ+ТКУ+Р
Эффективный КПД МГТУ	%	23,2	38,3	36	41,0
Температура газов на входе в охладитель газов	К	1127	602	797	570
Оптимальная степень повышения давления в компрессоре	–	12	5,9	12	5,2
Оптимальная степень повышения давления в ДК	–	–	–	5,0	2
Оптимальная степень регенерации	–	–	0,9	–	0,9
Удельная мощность на валу силовой турбины	кДж/кг	297	225	461	289
Удельная тепловая мощность	кДж/кг	894	283	508	253
КПД теплотехнический	%	93	87	76	77

Результаты исследования эффективности различных схем МГТУ на базе двигателей с ПП и ССТ на частичных нагрузках представлены на рисунках 31 и 32.

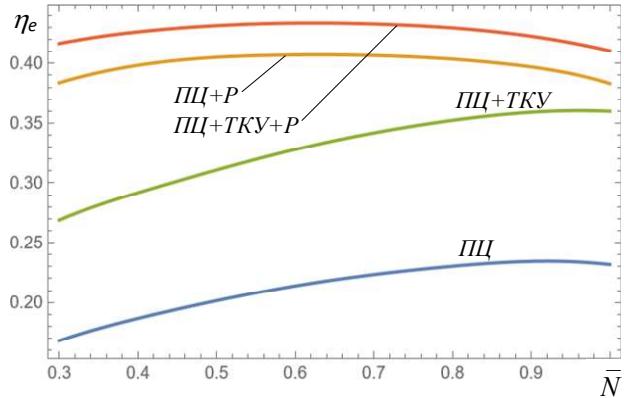
Результаты исследования теплотехнического КПД когенерационных МГТУ с промподогревом и ССТ при различных способах нагружения представлены на рисунках 33-34.

Анализ рисунков 33 и 34 показывает, что характер кривых для установок с регенерацией совпадает с рисунками 17 и 18. В тоже время из рисунка 33 видно, что теплотехнический КПД МГТУ на базе ПЦ и ПЦ+ТКУ заметно снижается при винтовом способе нагружения. Это объясняется тем, что  $T_3$  быстро снижается при таком способе нагружения, а  $T_{31} = T_3$ . В этом случае применение РСА может улучшить ситуацию вплоть до показанной на рисунке 34. Промежуточных результатов можно добиться поддерживая, например,  $T_{31} = T_{30}$  ( $T_{30}$  – максимальная температура цикла на номинальном режиме) или в

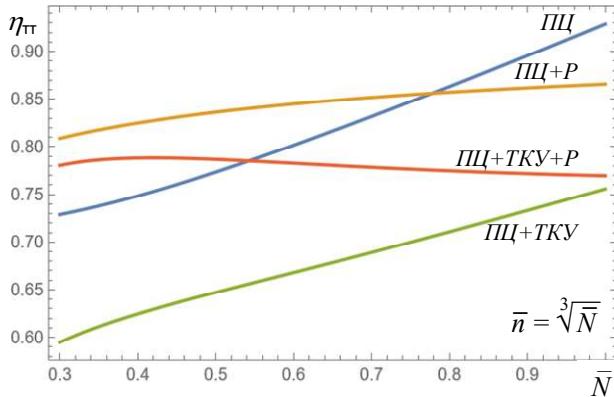
комбинации с использованием РСА.



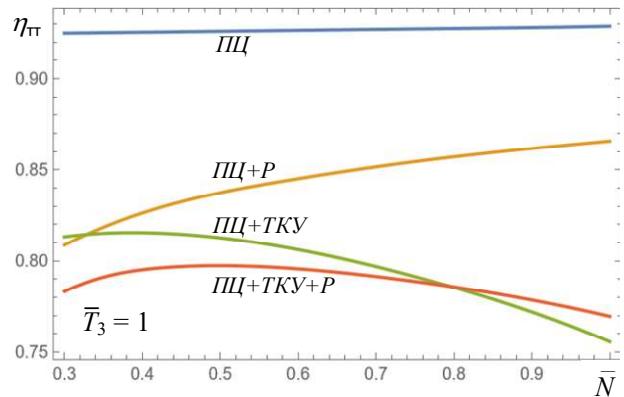
**Рисунок 31 – Зависимость КПД МГТУ, изображенных на рисунках 27-30, от относительной нагрузки при винтовом способе нагружения**



**Рисунок 32 – Зависимость КПД МГТУ, изображенных на рисунках 27-30, от относительной нагрузки при изотермическом способе нагружения**



**Рисунок 33 – Зависимость теплотехнического КПД МГТУ, изображенных на рисунках 27-30, от относительной нагрузки при винтовом способе нагружения**



**Рисунок 34 – Зависимость теплотехнического КПД МГТУ, изображенных на рисунках 27-30, от относительной нагрузки при изотермическом способе нагружения**

Использование РСА при наличии в составе систем автоматического управления МГТУ цифровых управляющих микроконтроллеров позволяет задать любую, в том числе и комбинированную, программу регулирования, использующую несколько факторов и обеспечивающую высокую эффективность и надежность работы установки на частичных нагрузках.

### Заключение

Проведенные исследования показали:

- При изотермическом способе нагружения каждая конфигурация когенерационной МГТУ имеет экономичный режим нагружения отличный от номинального, что позволяет иметь запас мощности.
- Сравнение всех способов нагружения показывает, что генераторный способ нагружения наименее эффективен для всех конфигураций когенерационных МГТУ.
- Машины с регенерацией показывают наибольшую эффективность во всем диапазоне нагрузки при изотермическом способе нагружения.
- МГТУ со свободной силовой турбиной имеет смысл применять в составе транспортных энергетических установок с редукторной передачей механической энергии нагрузке, а винтовой способ нагружения при наличии РСА в ССТ уместно использовать для экономии ресурсных показателей двигателя на долевых нагрузках.
- Использование РСА в машинах со ССТ позволяет задать любую программу

регулирования – от винтового способа регулирования до изотермического.

6. Очевидно, что общим для всех способов нагружения является снижение теплоты, переданной на теплоснабжение вместе с нагрузкой, поэтому дальнейшие исследования планируется выполнить по решению задачи стабилизации относительной тепловой мощности на частичных нагрузках.

7. Теплотехнический КПД когенерационных МГТУ для винтового и изотермического способов нагружения в большинстве случаев изменяется незначительно, что говорит о высокой эффективности использования топлива на частичных нагрузках, особенно для машин с регенерацией теплоты.

*Исследование выполнено по госбюджетной теме ИПТС «Создание научных основ разработки гибких комбинированных установок с интегрированными возобновляемыми источниками энергии и использованием местных ресурсов холода (FFMM-2024-0018)» (№ госрегистрации 124020100121-6).*

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Bohn, D. (2005) Micro Gas Turbine and Fuel Cell – A Hybrid Energy Conversion System with High Potential.* In *Micro Gas Turbines* (pp. 13-1 – 13-46).
2. Матвеенко В.Т. Глубокая утилизация теплоты в газотурбинных двигателях с турбиной перерасширения // Промышленная теплотехника. 1997. Т. 19. № 4-5. С. 81-85.
3. *Matviinko V. Variable regimes operation of cogenerative gas -turbine engines with overexpansionturbine/ V.Matviinko, V. Ocheretiany// Procecoligs of ASME Turbo Expo 2010: Power of Land, Sea and Air GT2010, June 14-18, 2010, Glasgow, UK, GT2010-22029.*
4. *Matvienko V. Gas Turbine Plant with Overexpansion Turbine and Heat Regeneration in the Ship Propulsion Complex / V. Matvienko, O. Andriets, V. Ochretiany // Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: June 16-20, 2014, Dusseldorf, Germany.*
5. *Matvienko V. Working Process Control in a Ship Gas Turbine Engine of Complex Cycle / V/ Matvienko, V. Ocheretiany // Procecoling of ASME Turbo Expo 2016: June 13-17, 2016, Seoul, South Korea.*
6. *Diener OF, van der Spuy SJ, von Backström TW, Hildebrandt T. Multi-Disciplinary Optimization of a Mixed-Flow Compressor Impeller.* ASME. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, Volume 8: Microturbines, Turbochargers and Small Turbomachines; Steam Turbines.
7. *Deng Q., Shao S., Lei F., Luan H., Feng Z. An Integrated Design and Optimization Approach for Radial Inflow Turbines – Part I: Automated Preliminary Design.* Applied Sciences. 2018. V. 8 (11). 2038 p. <https://doi.org/10.3390/app8112038>
8. *Vick M., Young T., Kelly M., Tuttle*  
*S., Hinnant K. A Simple Recuperated Ceramic Microturbine: Design Concept, Cycle Analysis, and Recuperator Component Prototype Tests.* Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. <https://doi.org/10.1115/GT2016-57780>
9. *Каблов. Е.Н., Орехов Н.Г., Толорая В.Н., Демонис И.М.* Литейные жаропрочные сплавы и технология получения монокристаллических лопаток ГТД // Технология легких сплавов. 2002. № 4. С. 100-105.
10. *Долголонян А.В., Матвеенко В.Т.* Оптимизация степени регенерации для циклов микрогазотурбинных установок // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2020. № 3 (341). С. 59-66.
11. *M.J. Moore Micro-turbine generators // Professional Engineering.* 2002. Printed in the USA. p.263.
12. *Барков В.В.* Выбор параметров и обоснование конструктивной схемы малогабаритной газотурбинной установки с независимым соотношением частот вращения роторов турбины и компрессора: специальность 05.04.12 «Турбомашины и комбинированные турбоустановки»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург, 2017. 22 с.
13. *Матвеенко В.Т.* Теплотехнические характеристики когенерационных газотурбогенераторов с регенерацией теплоты при переменном режиме работы // Авиационно-космическая техника и технология: сб. науч. тр. Харьков: НАУ «ХАИ», 2001 Вып. 23 С. 95-98.
14. Переходные процессы в газотурбинных установках / Под ред. д-ра техн. наук, проф. И. В. Котляра. Л.: Машиностроение. [Ленинград. отд-ние], 1973. 254 с.
15. *Матвеенко В.Т.* Управление характеристиками замкнутых газотурбинных установок пропульсивных комплексов подводных судов / В.Т. Матвеенко, А.В. Долголонян, В.А. Очеретяный // Морские интеллектуальные технологии. СПб.: НИЦ МИТ, 2021. № 4 (54) Т.1. С. 71-75.
16. *Долголонян А.В., Матвеенко В.Т., Клименко А.Г.* Управление генерацией теплоты в когенерационных газотурбинных установках с регенерацией на частичных нагрузках при различных способах нагружения, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3 часть 1, С. 59-69.
17. *Долголонян А.В., Матвеенко В.Т., Клименко А.Г.* Эффективность комбинированных газотурбинных установок на частичных нагрузках при различных видах нагружения, Морские интеллектуальные технологии 2023. № 2 часть 1, С. 104-115.
18. Характеристики современных судовых газотурбинных двигателей на переменном режиме /Тихомиров Б.А., Зо Вин Тхайк // Журнал «Морские интеллектуальные технологии». 2011. № 1. С. 41-47

19. Лазарев Л.Я., Фадеев В.А. Особенности течения газа в осевой ступени турбины с регулируемым сопловым аппаратом // Вестник МЭИ. 2022. № 5. С. 101-111.
20. Румянцев В.В., Лущеко В.А., Мавлеев И.Р., Павленко А.П. Турбокомпрессор с регулируемым сопловым аппаратом: газодинамический расчёт, 3D-моделирование, CFD-анализ, характеристики // Труды НАМИ. – 2023. – № 1 (292). – С. 6-18.
21. Матвеенко В.Т. Гибкие когенерационные технологии на базе энергетических газотурбинных технологий. 65 НТС по проблемам газовых турбин и парогазовых установок / В.Т. Матвеенко, В.А. Очеретяный, А.В. Долголонян // Сб. докладов. С.-Петербург. 18-19 сентября 2018 г. ОАО ВТИ. 2018. С. 93-101.
22. Долголонян А.В., Матвеенко В.Т., Клименко А.Г. Микрогазотурбинные установки с повышенными термодинамическими характеристиками, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 2 часть 1, С. 117-125.

**Долголонян Андрей Вартазарович**  
ФГБНУ Институт природно-  
технических систем Российской  
Федерации, г. Севастополь  
Кандидат технических наук, зав.  
лаборатории  
E-mail: dologlonyan@hotmail.com

**Матвеенко Валерий Тимофеевич**  
ФГБНУ Институт природно-  
технических систем Российской  
Федерации, г. Севастополь  
Доктор технических наук, гл.  
науч. сотр.  
E-mail: mvt3900@mail.ru

**Клименко Александр Георгиевич**  
ФГБНУ Институт природно-  
технических систем Российской  
Федерации, г. Севастополь  
ведущ. инженер-исследователь  
E-mail: kag195877@gmail.com

DOLOGLONYAN A.V., MATVENKO V.T., KLIMENKO A.G.

## **CHARACTERISTICS OF COGENERATION MICRO GAS TURBINE PLANTS WHEN OPERATING AT PARTIAL LOADS**

**Abstract.** The subject of the article is a comparative analysis of the methods of loading microgas turbine plants (MGTP) in order to study their characteristics at partial loads. MGTP based on microgas turbine engines (MGTE) with a locked and free power turbine (FPT) are considered. It has been found that machines with regeneration show the greatest efficiency in the entire loading range with an isothermal loading method, while each configuration of the cogeneration MGTP has an economical loading mode different from the nominal one, which makes it possible to have a power reserve. It was noted that it is advisable to use MGTP with a free power turbine as part of transport power plants with a gearbox transmission of mechanical energy to the load, and the screw loading method – in the presence of an adjustable nozzle device (AND) in the FPT, it is appropriate to use it to save the engine resource indicators on partial loads. It is shown that the use of AND in MGTE with uncooled turbines with FPT allows setting any control program – from the screw control method to isothermal.

**Keywords:** micro gas turbine plant, heat recovery, overexpansion turbine, turbocompressor utilizer, cogeneration, partial loads, adjustable nozzle device.

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Bohn, D. (2005) Micro Gas Turbine and Fuel Cell – A Hybrid Energy Conversion System with High Potential. In *Micro Gas Turbines* (pp. 13-1 – 13-46).
2. Matvienko V.T. Glubokaya utilizaciya teploty v gazoturbinnyyh dvigatelyah s turbinoj pererasshireniya (Deep heat recovery in gas turbine engines with an overexpansion turbine). Promyshlennaya teplotekhnika, 1997, Vol. 19, No. 4-5, pp. 81-85.
3. Matviinko V. Variable regimes operation of cogenerative gas -turbine engines with overexpansionturbine/V.Matviinko, V. Ocheretianiy// Procecoligs of ASME Turbo Expo 2010: Power of Land, Sea and Air GT2010, June 14-18, 2010, Glasgow, UK, GT2010-22029.
4. Matvienko V. Gas Turbine Plant with Overexpansion Turbine and Heat Regeneration in the Ship Propulsion Complex / V. Matvienko, O. Andriets, V. Ochretianyj // Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: June 16-20, 2014, Dusseldorf, Germany.
5. Matvienko V. Working Process Control in a Ship Gas Turbine Engine of Complex Cycle / V/ Matvienko, V. Ocheretianyi // Procecoling of ASME Turbo Expo 2016: June 13-17, 2016, Seoul, South Korea.
6. Diener OF, van der Spuy SJ, von Backström TW, Hildebrandt T. Multi-Disciplinary Optimization of a Mixed-Flow Compressor Impeller. ASME. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, Volume 8: Microturbines, Turbochargers and Small Turbomachines; Steam Turbines.
7. Deng Q., Shao S., Lei F., Luan H., Feng Z. An Integrated Design and Optimization Approach for Radial Inflow Turbines – Part I: Automated Preliminary Design. Applied Sciences. 2018. V. 8 (11). 2038 p. <https://doi.org/10.3390/app8112038>
8. Vick M., Young T., Kelly M., Tuttle
- S., Hinnant K. A Simple Recuperated Ceramic Microturbine: Design Concept, Cycle Analysis, and Recuperator Component Prototype Tests. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. <https://doi.org/10.1115/GT2016-57780>

9. Kablov E.N., Orekhov N.G., Toloraiya V.N., and Demonis I.M. Litejnye zharoprochnye splavy i tekhnologiya polucheniya monokristallicheskikh lopatok GTD (Casting heat-resistant alloys and technology for production of monocrystalline blades). Tekhnologiya legkih splavov, 2002, No. 4, pp. 100–105.
10. Dologlonyan A.V. and Matveenko V.T. Optimizaciya stepeni regeneracii dlya ciklov mikrogazoturbinnih ustanovok (Optimization of the degree of regeneration for cycles of microgas turbine plants). Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii, Orel: OGU im. I.S. Turgeneva, 2020, No. 3 (341), pp. 59–66.
11. M.J. Moore Micro-turbine generators // Professional Engineering. 2002. Printed in the USA. p.263.
12. Barskov V.V. Vybor parametrov i obosnovanie konstruktivnoj skhemy malogabaritnoj gazoturbinnoj ustanovki s nezavisimym sootnosheniem chasot vrashcheniya rotorov turbiny i kompressora (Selection of parameters and justification of the design scheme of a small-sized gas turbine unit with an independent ratio of the turbine and compressor rotor speeds). Synopsis of Cand. tech. sci. Barskov Viktor Valentinovich, St-Petersburg, 2017, 22 p.
13. Matveenko V.T. and Ocheretjanyj V.A. Teplotehnickeskie harakteristiki kogeneracionnyh gazoturbinnyh dvigatelej s promezhutochnym podgrevom gaza i silovoj turbinoj pererasshireniya (Thermal characteristics of cogeneration gas turbine engines with gas intermediate heating and an overexpansion power turbine) Vestnik SevGTU. Jenergetika. 2008. Vyp. 85. pp.115-119.
14. Perekhodnye protsessy v gazoturbinnykh ustanovkakh (Transient processes in gas turbine plants). Dr. tech. sci., prof. I. V. Kotlyar. Leningrad: Mashinostroenie. 1973. 254 p.
15. Matveenko V.T., Dologlonjan A.V. and Ocheretjanyj V.A. Upravlenie harakteristikami zamknutyh gazoturbinnyh ustanovok propulsivnyh kompleksov podvodnyh sudov (Control of characteristics of closed gas turbine plants of propulsion systems of underwater vessels). Morskie intellektualnye tehnologii. SPb.: NIC MIT, 2021. № 4 (54) T.1. Pp. 71-75.
16. Dologlonyan A.V. and Matveenko V.T. Upravlenie generaciej tepla v ciklah mikrogazoturbinnyh ustanovok s regenera-ciej teploty ([Control of heat generation in microgas turbine cycles with heat recovery]). Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. Orel: OGU im. I.S. Turgeneva, 2021. № 3 (347). pp. 3-11.
17. Dologlonyan A.V., Matveenko V.T., and Klimenko A.G. Effektivnost kombinirovannyh gazoturbinnyh ustanovok na chasticchnyh nagruzkah pri razlichnyh vidah nagruzheniya (Efficiency of combined gas turbine plants at partial loads under different types of loading). Morskie intellektualnye tehnologii, 2023, No. 2 (1), pp. 104-115.
18. Tihomirov B.A. and Zo Vin Thajk. Harakteristiki sovremennoj sudovyh gazoturbinnyh dvigatelej na peremennom rezhime (Characteristics of modern marine gas turbine engines in variable mode). Zhurnal «Morskie intellektualnye tehnologii». 2011. № 1. Pp. 41-47.
19. Lazarev L.Ja., Fadeev V.A. Osobennosti techenija gaza v osevoj stupeni turbiny s reguliruemym soplovym apparatom (Features of gas flow in the axial stage of a turbine with an adjustable nozzle apparatus). Vestnik MEI. 2022. № 5. Pp. 101-111.
20. Rumjancev V.V., Lushheko V.A., Mavleev I.R., Pavlenko A.P. Turbokompressor s reguliruemym soplovym apparatom: gazodynamicheskij raschjot, 3D-modelirovanie, CFD-analiz, harakteristiki (Turbocharger with variable nozzle apparatus: gas-dynamic calculation, 3D modeling, CFD analysis, characteristics). Trudy NAMI. 2023. № 1 (292). Pp. 6-18.
21. Matveenko V.T., Ocheretjanyj V.A. and Dologlonjan A.V. Gibkie kogeneracionnye tehnologii na baze jenergeticheskikh gazoturbinnyh tehnologij (Flexible cogeneration technologies based on power gas turbine technologies.). 65 NTS po problemam gazovyh turbin i parogazovyh ustanovok/ Sb. dokladov. S.-Peterburg. 18-19 sentjabrja 2018 g. OAO VTI. 2018. Pp. 93-101.
22. Dologlonjan A.V., Matveenko V.T., Klimenko A.G. Mikrogazoturbinnye ustanovki s povyshennymi termodinamicheskimi harakteristikami, Morskie intellektualnye tehnologii (Microgas turbine plants with increased thermodynamic characteristics). 2024. № 2 chast 1, Pp. 117-125.

**Dologlonyan Andrey Vartazarovich**  
FSBSI Institute of nature and technical systems,  
Russian Federation, Sevastopol  
Candidate of Technical Sciences, Chief of Laboratory,  
E-mail: dologlonyan@hotmail.com

**Matvienko Valerii Timofeevich**  
FSBSI Institute of nature and technical systems,  
Russian Federation, Sevastopol  
Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher  
E-mail: mvt3900@mail.ru

**Klimenko Alexander Georgievich**  
FSBSI Institute of nature and technical systems,  
Russian Federation, Sevastopol  
Leading Research Engineer  
E-mail: kag195877@gmail.com

КОЗЛОВ Д.А.

## ВЛИЯНИЕ ДОЗЫ ИОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА СТАЛИ И СПЛАВОВ

**Аннотация.** В работе приведены результаты оценки износа стальных образцов пар трения сталь-сталь после ионной имплантации в условиях сухого трения скольжения при высокой нагрузке. Показано влияние дозы имплантации на величину износа образцов. У имплантированных ионами меди образцов конструкционной стали износостойкость при дозе имплантации  $10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> и  $5 \times 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> повышается в 2 и 1,5 раза соответственно. Обсуждаются причины повышения износостойкости.

**Ключевые слова:** узлы трения, легирование поверхности, ионная имплантация.

### Введение

При работе различных механизмов их ресурс зависит от свойств поверхности контактирующих между собой деталей. Для повышения ресурса работы поверхность подвергают легированию различными способами. Обычно легирование осуществляется путем нанесения антифрикционных износостойких покрытий различными методами - гальваническим (электролитическое осаждение), механическим (метод ППД, метод ФАБО и др.), вакуумными (магнетронное, ионно-плазменное нанесение покрытий). Также легирование осуществляют за счет обработки поверхности концентрированными потоками энергии (это лазерные технологии, ионно-лучевые методы обработки и т.д.). Перечисленные методы имеют как достоинства так и недостатки, но все они направлены на повышение ресурса работы деталей. Для тяжелонагруженных пар трения при решении задач по износостойкости и антифрикционности наиболее эффективным проявил себя подход с использованием микромодифицирования поверхности металлокомпозитами продуктами, которые, находясь в зоне контактирования под воздействием выделяемой при трении энергии формируют микропокрытия, локализующие сдвиговые деформации в более мягком материале и предотвращающие схватывание. В качестве таких продуктов широко используются комплексные соединения меди [1]. Медь на границу раздела трущихся поверхностей вводится различными способами – в виде легирующего элемента к основному материалу [2], обеспечивающему снижение износа трибосопряжения; в виде покрытий, наносимых различными методами, такими как метод газодинамического напыления [3], метод электролитического осаждения [4], методом электроискрового легирования [5].

Кроме приведенных методов легирования поверхностей, применяемых для повышения ресурса работы, можно выделить метод ионного легирования или ионной имплантации. Интерес к данному методу обработки возник несколько десятилетий назад, но интенсивное развитие он получил в 80-90-х годах. Метод заключается во внедрении потока заряженных частиц – ионов в поверхность обрабатываемых деталей. По сути, он представляет собой легирование поверхности в микрообъемах, размер которых составляет единицы микрометров. Интерес к этому методу объясняется его широкими технологическими возможностями, позволяющими внедрять в поверхностные слои ионы практически любых элементов. Отличительной особенностью метода является возможность обрабатывать поверхность без нагрева обрабатываемой детали, так как довольно часто одним из важных условий является сохранение основных прочностных характеристик обрабатываемого материала по объему в процессе обработки с целью предотвращения ухудшений механических свойств.

Целью данной работы является оценка триботехнической эффективности легирования поверхности стали и сплавов методом имплантации.

### Основная часть

В работе было проведено испытание образцов конструкционной стали 30ХГСН2А на износ в исходном состоянии и после модификации поверхности методом имплантации ионов меди, взятой в качестве основного легирующего элемента.

В качестве объекта исследования была взята пара трения сталь-сталь. Состав конструкционной стали соответствует ГОСТ 4543-71. Перед испытаниями образцы подвергали предварительной термообработке, состоящей из нагрева до  $900\text{--}910^{\circ}\text{C}$ ,

охлаждения в масле и отпуска при температуре 210-215°C в течение 2-2,5 часов. Такой режим обработки позволил достичнуть значение твердости 42...45 HRC.

Имплантацию ионов меди осуществляли на источнике ионов металлов, работающего в импульсном режиме и генерирующего полиэнергетический пучок ионов. Варьируемым параметром была доза имплантации, остальные параметры процесса были постоянными: ускоряющее напряжение пучка 30 кВ, средняя величина ионного тока пучка 0,1 А, длительность импульса 300 мкс, остаточное давление в камере составляло  $5 \times 10^{-5}$  мм.рт.ст., диаметр пучка 200 мм, температура облучаемых образцов не превышала 100°C.

Режимы обработки приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Доза имплантируемых ионов

№ режима	Доза имплантации ионов меди
0	Исходный (без обработки)
1	$10^{17}$ ион/см <sup>2</sup>
2	$5 \times 10^{17}$ ион/см <sup>2</sup>

Испытание на износостойкость проводили на машине трения КЕ-4 в режиме сухого трения. Валы диаметром 100 мм испытывали в паре с исследуемыми образцами диаметром 11,3 мм. Вал вращался с постоянной окружной скоростью 0,06 м/с. На первом этапе испытания проводили притирку рабочих поверхностей в течение одного часа при контактном давлении  $P_0=25$  МПа. В дальнейшем контактное давление увеличивали через каждый час работы на 25 МПа до предельной величины 250 МПа.

На рисунке 1 представлена зависимость толщины изношенного слоя образцов из исследуемой стали от пути трения. Как видно из графика, наиболее высокий износ характерен для исходных образцов (кривая 1). При прохождении отрезка пути трения, равного 4,5м, величина изношенного слоя составляет примерно 40 мкм, на пути трения до 18 м реализуется режим установившегося трения. При увеличении пути трения износ возрастает, и пара переходит в режим повреждаемости. Эта закономерность изнашивания сохраняется и для образцов, имплантированных медью при максимальной используемой в эксперименте дозе  $5 \cdot 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>. Износ также уменьшается при достижении установленного режима, а затем наблюдается некоторое возрастание износа и тенденция перехода в режим повреждаемости (кривая 3). При этом разрушение поверхности имплантированных образцов на одном и том же отрезке пути трения равном 15м, уменьшается почти в 1,5 раза по сравнению с исходными образцами. Наилучшие результаты показали образцы с дозой имплантации  $10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> (кривая 2). Уменьшение уровня разрушения на всем пути трения достигает практически двукратной величины.

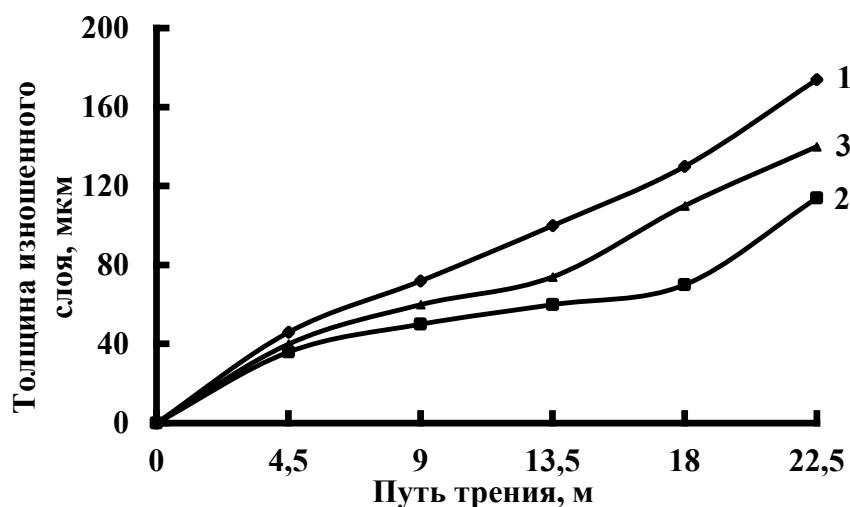


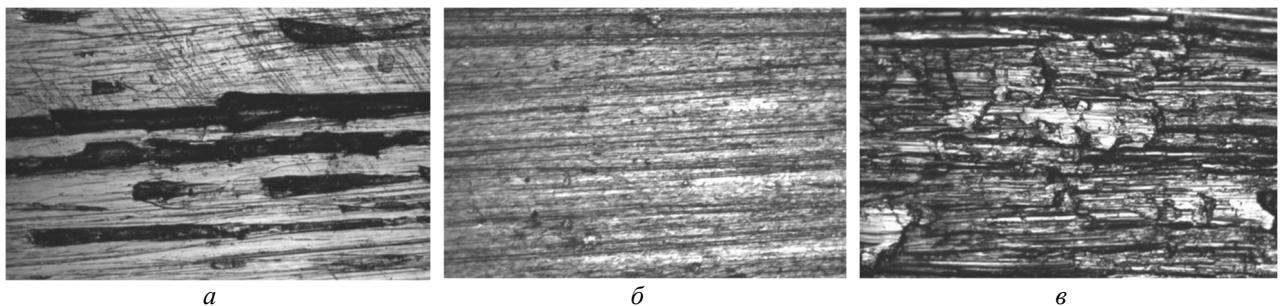
Рисунок 1 - Зависимость толщины изношенного слоя образцов из конструкционной стали 30ХГСН2А от пути трения: 1 – исходный образец; 2 – доза облучения  $10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> (режим 1); 3 –  $5 \cdot 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> (режим 2)

Следует заметить, что ход кривых, отражающих изменение уровня поверхностного разрушения при испытаниях, свидетельствует, что при достижении достаточно большого отрезка пути трения образцы с имплантированными ионами меди не достигают величины разрушения исходного образца: на пути трения 22,5 м износ стали с дозой облучения  $5 \cdot 10^{17}$  ион/ $\text{см}^2$  меньше на 20%, а с дозой  $10^{17}$  ион/ $\text{см}^2$  – на 60% по сравнению с износом необработанной стали. При этом толщина изношенного слоя составляет порядка 160 мкм, 120 мкм и 100 мкм соответственно для исходного, после имплантации с дозами  $5 \cdot 10^{17}$  и  $10^{17}$  ион/ $\text{см}^2$ . Следовательно, учитывая толщину модифицированного слоя (доли микрометров) эффект влияния имплантации меди в сталь проявляется на значительно больших глубинах (более чем на три порядка), чем толщина модифицированного слоя.

Особенности повреждений и разрушения исследуемых контактирующих поверхностей можно видеть из анализа топографии поверхности трения, проведенного с помощью световой микроскопии, рисунок 2.

При испытаниях образцов стали без обработки на контактирующих поверхностях создаются борозды пропахивания, задиры, вырывы металла, рисунок 2а. Такой вид поверхности свидетельствует об адгезионном механизме изнашивания, приводящем к интенсивному процессу накопления повреждаемости, разрушению слоев и переходу к предельному эксплуатационному состоянию, соответствующему  $\sim 160$  мкм износа.

Особенность поверхности трения образцов с дозой облучения  $5 \times 10^{17}$  ион/ $\text{см}^2$ , рисунок 2в, состоит в наличии отдельных, не покрывающих всю зону контакта, выглаженных участков, обогащенных медью. Есть основания полагать, что такой островковый характер формирования защитных покрытий связан с плато на кривой распределения меди по глубине модифицированного слоя. Сформированные островковые покрытия, обладая свойством антифрикционности, частично экранируют и защищают поверхность от разрушения, что находит выражение в меньшем количестве следов пропахивания и задиров, чем в образцах без обработки, и, как следствие, работоспособность сопряжения увеличивается.



**Рисунок 2 - Микрофотография поверхности образцов стали 30ХГСН2А после испытаний на износ, ( $\times 100$ ):**  
а – исходный образец; б – доза облучения  $10^{17}$  ион/ $\text{см}^2$ ; в –  $5 \times 10^{17}$  ион/ $\text{см}^2$

Поверхности трения образцов, облученных с дозой имплантации  $10^{17}$  ион/ $\text{см}^2$  (таблица 1), содержат слой меди, равномерно распределенный по всей зоне контакта, рисунок 2б, не наблюдается. Присутствие меди на поверхности контакта способствует реализации положительного градиента механических свойств по глубине зоны контактной деформации, создает условия для нормального режима внешнего трения, что приводит к существенному повышению износостойкости стали и работоспособности сопряжения в целом. Меньшие потери на трении в паре с образцом, имплантированным с дозой  $10^{17}$  ион/ $\text{см}^2$ , являются следствием оптимального количества меди в зоне контакта и как следствие более высокого качества поверхности с позиций микрогеометрических характеристик, рисунок 2б.

Таким образом, представленные экспериментальные исследования указывают на три важных фактора влияния ионно-лучевой обработки на триботехнические характеристики легированной стали. Во-первых, имплантация ионов меди в легированную сталь обеспечивает значительное повышение ее износостойкости даже в условиях сухого трения при высоких внешних нагрузках. Во-вторых, положительный эффект имплантации проявляется и в то время, когда первичный ионно-легированный слой уже разрушен. В процессе контактной деформации формируются вторичные модифицированные слои, защищающие поверхностные

слои стали от интенсивного разрушения. Изучение механизма формирования вторичных слоев является важной составляющей управления этим процессом и, соответственно, решением задач повышения работоспособности пар трения. В-третьих, использование меди для метода ионно-лучевой обработки перспективно с точки зрения возможности реализации в паре трения режима повышенной износостойкости, что особенно важно для условий применения в среде специальных смазочных материалов [6].

Анализ литературных данных свидетельствует о перспективности применения ионно-лучевой обработки (в частности ионной имплантации) для модифицирования металлов и сплавов с целью повышения их эксплуатационных свойств (сопротивления усталости, износостойкости, коррозионной стойкости, жаростойкости и др.). С помощью такого вида обработки конструкционные материалы можно легировать любыми элементами, при этом используют пучки ионов газов и металлов, и процесс модифицирования может быть реализован при достаточно низких температурах, не влияющих на характеристики механических свойств материала обрабатываемого изделия.

Практика применения ионной имплантации для триботехнических целей указывает на наиболее частое использование ионов азота, углерода и бора для модифицирования поверхности, что вполне объяснимо, учитывая опыт применения химико-термической обработки (азотирования, цементации, борирования) для повышения эксплуатационных свойств [7]. В качестве примера можно привести работу [8], где исследовано влияние имплантации азота и углерода на износостойкость подшипниковой стали. График износа подшипниковой стали в зависимости от дозы имплантации азота показан на рисунке 3, где показано, что оптимальная доза при имплантации ионов как азота, так и углерода соответствует  $10^{17}$  ион/ $\text{см}^2$ . Меньшая доза не дает достаточного упрочнения поверхностного слоя, а при превышении дозы выше оптимальной имеет место повышенное содержание нитридов и карбидов в поверхностном слое, приводящее вместе с увеличением твердости к охрупчиванию материала и потере пластичности, в результате чего при трении происходит скальвание твердых частиц поверхностного слоя, их попадание в зону трения и образование больших царапин, приводящее к увеличению износа.

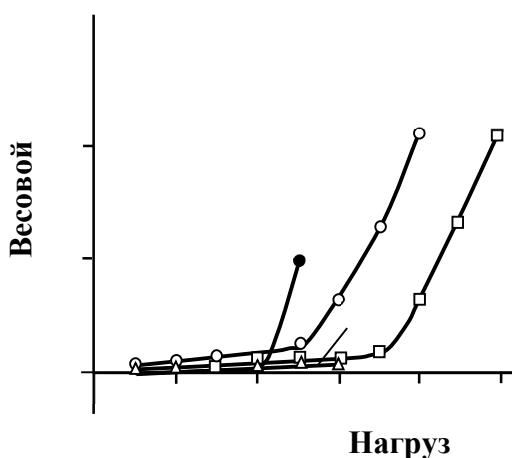


Рисунок 3 - Зависимость износа образцов из стали ШХ15 от времени и нагрузки при облучении ионами азота: 1 – исходный образец; 2 – доза облучения  $10^{16}$  ион/ $\text{см}^2$ ; 3-  $10^{17}$  ион/ $\text{см}^2$ ; 4 -  $5 \times 10^{17}$  ион/ $\text{см}^2$  [8]

Как показывают исследования многочисленных работ по имплантации ионов азота и углерода в конструкционные материалы [9,10], практически во всех проводимых экспериментах оптимальной дозой, при которой происходило максимальное повышение эксплуатационных свойств, являлась доза  $10^{17}$  ион/ $\text{см}^2$ . При этой дозе происходит увеличение твердости поверхностного слоя при сохранении пластичности, что способствует уменьшению износа.

Помимо увеличения твердости поверхностных слоев при имплантации азота во многих случаях происходит формирование напряжений сжатия, что также способствует повышению износостойкости. Кроме того, напряжения сжатия способствуют увеличению усталостной прочности материалов [11]. Это связано с радиационными дефектами, улучшающими

гомогенность деформации. Весьма интересным является тот факт, что положительный эффект при усталостных испытаниях был обнаружен при внедрении ионов с большим атомным радиусом, в результате чего также было отмечено появление сжимающих напряжений. Поэтому уместно предположить, что внедрение ионов с большим атомным радиусом способствует повышению износостойкости (атомный радиус железа, составляющего основу стали 1,26 Å, атомный радиус меди 1,28 Å, а размер атомных радиусов азота и углерода соответственно 0,77 Å и 0,71 Å).

Зачастую при работе в условиях трения скольжения твердость поверхностного слоя не всегда является лимитирующим фактором, определяющим сопротивление изнашиванию. Большое значение приобретают способность поверхностных слоев передеформироваться, не испытывая сильного наклена [12]. Во многих работах авторы обращают внимание на то, что толщина модифицированного слоя при ионной имплантации значительно меньше, чем истираемые слои при трении, но при этом имеет место значительное уменьшение интенсивности изнашивания. Была предпринята попытка объяснения данного эффекта [13,14]. Высказано предположение, что сохранение высокой износостойкости связано с диффузией легирующей примеси в глубинные слои материала при трении, которая стимулируется градиентом термических и механических напряжений на пятнах фактического контакта, тем самым постоянно оставаясь в зоне контакта двух поверхностей.

На основании приведенных данных можно сделать вывод, что имплантация ионами меди создает благоприятные условия для реализации структурного состояния поверхностных слоев, создающих в процессе трения благоприятные условия на поверхности контакта двух тел, способствующих уменьшению износа.

### Заключение

Можно заключить, что легирование поверхности стали 30ХГСН2А методом имплантации ионов меди обеспечивает высокий триботехнический эффект: значительное повышение работоспособности тяжелонагруженного сопряжения сталь – сталь в условиях сухого трения скольжения. Уровень поверхностного разрушения зависит от дозы облучения: износ уменьшается в 2 и 1,5 раза при дозах облучения  $1 \times 10^{17}$  и  $5 \times 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> соответственно.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кужаров А.С., Бурлакова В.Э., Задошенко Е.Г., Кужаров А.А., Бурлов А.С., Ураев А.И., Кравчик К., Гарновский А.Д. Триботехнические возможности координационных соединений меди при трении бронзы по стали// Трение и износ. – 2005. – Т.26. – №6. – С.628 -637.
2. Степанова Н.В. Влияние меди на комплекс механических и антифрикционных свойств заэвтектоидных сталей и чугунов. Дис. на соиск. ученой степени канд. техн. наук. Новосибирск, НГТУ, 2018. 203 с.
3. Сачек Б.Я., Мезрин А.М., Архипов В.Е., Лондарский А.Ф. Модифицирование поверхности трибосопряжений напылением металлических покрытий для повышения фrettингстойкости // Трение и износ. – 2018. – Т. 39. – № 4. – С.376-381.
4. Шелех В.К., Леванцевич М.А., Пилипчук Е.В., Дема Р.Р. Исследование работоспособности медных покрытий, сформированных методами гальванического осаждения и деформационного плакирования гибким инструментом // Трение и износ. – 2018. – Т. 39. – № 1. – С.11-17.
5. Иванов В.И., Костяков А.Ю. Электроискровое нанесение покрытий // Ритм машиностроения. – 2016. – №10. – С. 36–41.
6. Ion implantation technology. Proc.7 Int.Conf. Kyoto. 1988 // Nucl.Instrum. and Mech. Phys. Res. B. – 1989. – V.37. – P.38- 44.
7. Герасимов С.А., Куксенова Л.И., Лаптева В.Г. Структура и износостойкость азотированных конструкционных сталей и сплавов. М.: Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2014. 518 с.
8. Васильева Е.В., Савичева С.М., Смирнов Г.П., Сапоженков А.Г., Федоров А.В. Влияние имплантации ионов азота и углерода на стойкость подшипниковой стали // Физика и химия обработки материалов. – 1989. – №1. – С.80-82.
9. Ecer M., Susan W., Boes D., Schreurs J. // Wear. – 1983. – Vol.89. – N 2. – P. 201-214.
10. Oliver W.C., Hutchings R., Pethica J.B. e.a. Ion implantation and Ion Beam process Mater. Symp. Boston, Mass. 14-17 Nov. 1983. N.Y., e.a., 1984. – P. 705-710.
11. Dearnaley G. // Electroplat and Metal. Finish. - 1976. – Vol. 29. – N 7-8. – P. 27-29.
12. Белый А.В., Ших С.К. Ионно-лучевое легирование и триботехнические свойства металлов и сплавов // Трение и износ. – 1987. – Т.8. – №3. – С. 330-343.
13. Белый А.В. // Труды Международной конференции «Трение, износ и смазочные материалы». Ташкент, 1985. – С.4.
14. Титов В.В. Роль механических напряжений при легировании материалов с помощью ионных пучков. М., 1983. (Препринт / Ин-т атомной энергии АН СССР, № 3774/11).

**Козлов Дмитрий Александрович**

ИМАШ им. А.А.Благонравова РАН, г. Москва

к.т.н., научный сотрудник

101000, г. Москва, Малый Харитоньевский пер., 4

Тел. (916) 823-58-39

E-mail: koslov74@mail.ru

KOZLOV D.A.

## **INFLUENCE OF ION ALLOYING DOSE ON PERFORMANCE PROPERTIES OF STEEL AND ALLOYS**

**Abstract.** The paper presents the results of evaluating the wear of steel samples of steel-to-steel friction pairs after ion implantation under dry sliding friction conditions at high load. The effect of the implantation dose on the wear of the samples is shown. In copper-implanted structural steel samples, the wear resistance at an implantation dose of  $10^{17}$  ion/cm<sup>2</sup> and  $5 \times 10^{17}$  ion/cm<sup>2</sup> increases by 2 and 1.5 times, respectively. The reasons for the increase in wear resistance are discussed.

**Keywords:** friction units, surface alloying, ion implantation.

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Kuzarov A.S., Burlakova V.E., Zadoshenko E.G., Kuzarov A.A., Burlov A.S., Uraev A.I., Kravcik K., Garnovskiy A.D. Tribotechnicheskie vozmoznosti koordinacionix soedineniy medi pri treniibronzi po stali // Trenie i iznos. – 2005. - T.26/ - №6. – S.628 – 637.
2. Stepanova N.V. Vliyanie medi na kompleks mekhanicheskikh i antifrikcionnykh svojstv zaehvtektoidnykh stalej i chugunov. Dis. na soisk. uchenoj stepeni kand. tekhn. nauk. Novosibirsk, NGTU, 2018. 203 s.
3. Sachek B.YA., Mezrin A.M., Arkhipov V.Ye., Londarskiy A.F. Modifitsirovaniye poverkhnosti tribosopryazheniy napyleniyem metallicheskikh pokrytiy dlya povysheniya frettingostoykosti // Trenie i iznos. – 2018. – T. 39. – № 4. – S.376-381.
4. Shelekh V.K., Levancevich M.A., Pilipchuk E.V., Dema R.R. Issledovanie rabotosposobnosti mednykh pokrytij, sformirovannykh metodami galvanicheskogo osazhdeleniya i deformacionnogo plakirovaniya gibkim instrumentom // Trenie i iznos. – 2018. – T. 39. – № 1. – S.11-17.
5. Ivanov V.I., Kostyakov A.YU. Ehlektriskrovoe nanesenie pokrytij // Ritm mashinostroeniya. – 2016. – №10. – S. 36–41.
6. Ion implantation technology. Proc. 7 Int.Conf. Kyoto. 1988 // Nucl.Instrum. and Mech. Phys. Res. B. – 1989. – V.37. – P.38- 44.
7. Gerasimov S.A., Kuksanova L.I., Lapteva V.G. Structura I iznosostoikost asotirovannich konstruktsionich stalei I splavov. – M.:izd-vo MGTU im.Baumana, 2014. 518 s.
8. Vasileva E.V., Savicheva S.M., Smirnov G.P., Sapozhenkov A.G., Fedorov A.V. Vliyanie implantacii ionov azota i ugleroda na stojkost podshipnikovoj stali // Fizika i khimiya obrabotki materialov. – 1989. – №1. – S.80-82.
9. Ecer M., Susan W., Boes D., Schreurs J. // Wear. – 1983. – Vol.89. – N 2. – P. 201-214.
10. Oliver W.C., Hutchening R., Pethica J.B. e.a. Ion implantation and Ion Beam process Mater. Symp. Boston, Mass. 14-17 Nov. 1983. N.Y., e.a., 1984. – P. 705-710.
11. Dearnaley G. // Electroplat and Metal. Finish. - 1976. – Vol. 29. – N 7-8. – P. 27-29.
12. Belyj A.V., Shikh S.K. Ionno-luchevoe legirovanie i frikcionnye svojstva metallov i splavov // Trenie i iznos. – 1987. – T.8. – №3. – S. 330-343.
13. Belyj A.V. // Trudy Mezhdunarodnoj konferencii «Trenie, iznos i smazochnye materialY». Tashkknt, 1985. – S.4.
14. Titov V.V. Rol mekhanicheskikh napryazhenij pri legirovaniyu materialov s pomoshchju ionnykh puchkov. M., 1983. (Preprint / In-t atomnoj ehnergii AN SSSR, № 3774/11).

**Kozlov Dmitry Alexandrovich**

IMASH named after A.A. Blagonravov, Moscow

Ph.D., scientist

101000, Moscow, M. Kharitonovskiy Pereulok, 4

Ph: (916) 823-58-39

E-mail: koslov74@mail.ru

© Козлов Д.А., 2024

## ПРОГНОЗНЫЕ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ПРИ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКЕ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ

**Аннотация.** Процесс финишной обработки тонкостенных труб характеризуется влиянием индeterminированных факторов, требующих обратной связи по качеству изготавливаемой поверхности. При осуществлении такой обратной связи человеком-оператором в виде периодических сеансов контроля неизбежны значительные временные затраты, отсутствие обратной связи приводит к неустранимым ошибкам поверхности что снижает выход годных изделий. Дальнейшее повышение производительности линий финишной обработки труб связано с переводом процесса в полностью автоматический режим с непрерывным контролем поверхности при полировании. Оценка и прогноз показателей качества в данном режиме требуют математических методов, адекватных на длительных временных интервалах, что и рассмотрено в настоящей работе.

**Ключевые слова:** финишная обработка, тонкостенная труба, упруго-массовая система, управление качеством.

**Введение.** Продолжительность финишной обработки тонкостенных труб зависит от требуемого качества получаемой поверхности [1]. В течение обработки в различной степени могут возникнуть овальность, разнотолщинность, конусность, бочкообразность, концентрированные дефекты поверхности [2].

Детерминированному ходу процесса обработки препятствует наличие плохо прогнозируемых упруго-массовых явлений, связанных с малым отношением толщины стенки к радиусу трубы [3].

Поэтому, при малых допусках и наличии перечисленных эффектов, увеличивается роль промежуточного контроля качества изготавливаемого изделия [4].

Создание системы управления технологическим процессом в реальном времени требует обратной связи, тем или иным способом задействующей комплексные показатели качества.

При этом упреждению нежелательного хода обработки мешает малый интервал прогнозирования этих показателей с необходимым уровнем достоверности.

В настоящей работе мы рассматриваем методику дальнего прогнозирования геометрических дефектов внешней поверхности тонкостенного цилиндрического изделия для создания эффективного алгоритма управления его финишной обработкой.

### Цель работы.

Получение предельных оценок для комплексных показателей качества при больших временных интервалах финишной обработки тонкостенных изделий цилиндрической формы.

**Материал исследования.** В качестве базового контура примем трехмерную внешнюю цилиндрическую поверхность готового изделия. Она характеризуется постоянным радиусом, который обозначим через  $R_m$ , точка на этой поверхности задается двумя координатами:  $l$  – расстояние от первой базовой плоскости, которая перпендикулярна оси трубы и  $\varphi$  – угол поворота радиус-вектора, нормального к оси трубы и идущего к рассматриваемой точке, относительно второй базовой плоскости, которая проходит через ось трубы.

Рассмотрим ошибку обработки как отклонение радиуса изделия в процессе обработки от радиуса готового изделия.

Учитывая тот факт, что по большей части радиус изделия уменьшается в процессе обработки, будем рассматривать разность

$$\Delta R = R - R_t \quad (1)$$

как функцию точки с координатами  $(l, \varphi)$  на обрабатываемой поверхности

$$\Delta R = \Delta R(l, \varphi) \quad (2)$$

Считаем, что при обработке изделие сканируется излучением оптического диапазона, попадающим на матрицу фотоприемника, аналогично схеме, рассмотренной в работе [5].

Повторяя процесс сканирования для разных точек обрабатываемого изделия, представим мгновенную форму поверхности в виде тригонометрического ряда с переменными коэффициентами по длине трубы

$$\Delta R(l, \varphi) = a_0(l) + \sum_{n=0}^{\infty} a_n(l) \cdot \cos n\varphi + b_n(l) \cdot \sin n\varphi. \quad (3)$$

Рассмотрим следующую меру общей ошибки поверхности, следующую из формулы (3)

$$W = \int_0^L \sum_{n=0}^{\infty} \sqrt{a_n^2(l) + b_n^2(l)} dl . \quad (4)$$

где  $L$  – длина обрабатываемой трубы, м.

В процессе обработки форма изделия меняется, поэтому выражение (4) постоянно только в фиксированый момент времени  $t$ .

Для разных моментов времени получим отображение  $t \rightarrow W$ , к рассмотрению свойств которого и перейдем.

Рассмотрим это отображение в виде формальной функции

$$W = W(t) \quad (5)$$

Считая данную функцию аналитической, будем искать её прогнозную оценку при неограниченном возрастании времени.

Пусть начальному моменту прогноза ( $t = 0$ ) соответствует представление  $W(t)$  в виде степенного ряда

$$W(t) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n \cdot t^n , \quad (6)$$

где  $n$  – целочисленный индекс суммирования,  $c_n$  – коэффициенты ряда, которые, в частности, можно определить по формуле Тейлора

$$c_n = \frac{1}{n!} \cdot \left. \frac{d^n W(t)}{dt^n} \right|_{t=0} . \quad (7)$$

Считаем, что эти коэффициенты заданы в достаточном количестве с помощью анализа последовательности значений функции  $W$ , взятых в различные моменты времени.

Известно, что разложения функций вида правой части (6), как правило, обладают малым прогностическим интервалом. Последовательность дискретных значений левой части (6) не обладает им вовсе и допускает произвол исследователя при выборе метода экстраполяции.

Хорошими прогностическими свойствами для монотонных ограниченных функций обладает разложение  $W(t)$  в ряд по обратным степеням времени

$$W(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{q_n}{t^n} , \quad (8)$$

однако коэффициенты его не допускают вычисления в замкнутой форме.

Рассмотрим функцию комплексной переменной

$$u(z) = W\left(\frac{z}{1-z}\right). \quad (9)$$

Обозначим

$$u(z) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n^* \cdot z^n , \quad (10)$$

где коэффициенты  $c^*$  определяются [6] и [7] по формуле

$$c_n^* = \sum_{i=0}^{n-1} \binom{n-1}{i} \cdot c_{i+1} \quad (11)$$

Представим правую часть формулы (9) как композицию функций  $W(y(z))$ , где

$$y(z) = \frac{z}{1-z} . \quad (12)$$

Используем свойства функции (12) для нахождения формул взаимного перехода между коэффициентами рядов (3) и (4).

Непосредственно из (9) следует обратное преобразование

$$W(z) = u\left(\frac{z}{1+z}\right). \quad (13)$$

Учитывая (13), представим правую часть (8) в виде

$$u\left(\frac{z}{1+z}\right) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{q_n}{z^n} . \quad (14)$$

Решив соответствующее функциональное уравнение, приведем (14) к ряду по неотрицательным степеням  $z$ , коэффициенты которого могут быть вычислены известными способами:

$$u\left(\frac{1}{1+z}\right) = \sum_{n=0}^{\infty} q_n \cdot z^n. \quad (15)$$

Последовательно дифференцируя левую часть (15) и используя формулу Тейлора, получим непосредственные соотношения для коэффициентов ряда (3):

$$\begin{cases} q_0 = u(1) \\ q_1 = -u'(1) \\ q_2 = \frac{u''(1)}{2} + u'(1) \\ \dots \\ q_n = \frac{1}{n!} \cdot \left. \left\{ u^{(n)} \left( \frac{1}{z+1} \right) \right\} \right|_{z=0} \end{cases}. \quad (16)$$

Отметим, что достаточным условием наличия у функции  $W(z)$  аналитичности в области, на которой были построены допущения, будет выполнение соотношения

$$R > 1, \quad (17)$$

где  $R$  – радиус сходимости ряда (10).

При наличии же аналитичности действительная часть комплекснозначной функции времени позволяет по фиксированному набору значений  $W_1, W_2, \dots, W_n$ , определить свои свойства при неограниченном возрастании действительного времени  $t$ . Данный эффект в том числе позволяет заблаговременно произвести управляющее воздействие при нерасчетном ходе обработки

### Выводы

В настоящей работе предложен способ получения предельных оценок комплексного показателя качества при финишной обработке тонкостенных труб.

Методика основана на последовательном получении значений интегральной меры отклонений (4) поверхности получаемого изделия с построением коэффициентов ряда (6) по положительным степеням времени.

Временной интервал сбора информации предполагается существенно меньшим интервала прогноза, который условно считается неограниченным.

В результате асимптотических преобразований (12) ... (16) на выходе получается набор коэффициентов разложения прогнозируемой величины в ряд по отрицательным степеням времени (правая часть формулы (14)).

Подстановка их в ряд позволяет количественно описать непосредственно предельное значение показателя качества и ход изменения его во времени при приближении к бесконечно удаленной точке.

С практической точки зрения фактор временной избыточности прогноза позволяет произвести коррекцию режима обработки до приобретения изделием нерасчетной формы.

Управляющий контур включает блок сканирования поверхности с применением линеаризованного уравнения и расчетный блок, вычисляющий несколько последовательных значений меры отклонений (4) цилиндра до завершения прохода инструмента.

На основании вычисленных значений меры комплексного показателя качества делается прогноз о ходе обработки при неограниченном возрастании времени (18).

При неблагоприятном значении прогноза задействуется блок управления, формирующий корректирующее воздействие в виде изменения вектора параметров технологического процесса.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ушаков А.С. О производстве стальных труб/А.С. Ушаков, Л.А. Кондратов //Сталь, 2018, №. 7, С. 33-43.

2. Клубович В.В. Технологии обработки тонкостенных труб постоянного и переменного профиля/ В.В. Клубович, В.А. Томило, В.В. Левкович// Металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов / редкол.: И. А. Иванов (гл. ред) [и др.]. – Минск: БНТУ, 2019. – вып. 40. – с. 203 – 212.
3. Томило В.А. Ротационное выдавливание при обработке тонкостенных труб/В.А. Томило, В.В. Левкович//Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка, 2022 – с. 725 – 730.
4. Лаврентьев А.М. Исследование процесса ротационного обкатывания длинных тонкостенных труб/А.М. Лаврентьев// Современные наукоемкие технологии, 2020.. – вып. 7 – с. 73 – 77.
- 5 Неменко А.В. Линейная реконструкция положения контролируемого объекта/А.В. Неменко, М.М. Никитин//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2020, №4-2(342), С.136 – 140.
6. Неменко А.В. Прогнозная оценка параметров теплового поля судовой энергетической установки/ А.В. Неменко, М.М. Никитин// Вестник СевНТУ. Сер. Механика, энергетика, экология: сб. науч. тр. – Севастополь, 2014. – вып. 148 – с. 207 – 210.
7. Неменко А.В. Дальний прогноз эксплуатационной надежности производственной системы/А.В. Неменко, М.М. Никитин//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2022, №4(354),с.58 - 64.

**Неменко Александра Васильевна**

ФГАОУ «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Цифровое проектирование»  
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33  
Тел. +79788330519  
E-mail: valesan@list.ru

**Никитин Михаил Михайлович**

ФГАОУ «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь  
Старший преподаватель кафедры «Высшая математика»  
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33  
Тел. +79788150316  
E-mail: m.nikitin.1979@gmail.com

NEMENKO A.V., NIKITIN M.M.

**FORECAST ESTIMATORS OF QUALITY FACTORS WHILE THIN-WALLED TUBES FINISHING**

**Abstract.** The process of finishing processing of thin-walled pipes is characterized by the influence of indeterminated factors requiring feedback on the quality of the manufactured surface. In the implementation of such feedback by a person-operator in the form of periodic control sessions, significant time costs are inevitable, the absence of feedback leads to unsettled surface errors, which reduces the output of suitable products. A further increase in the productivity of the finish processing lines of pipes is associated with the transfer of the process into a fully automatic regime with continuous control of the surface during polishing. Assessment and forecast of quality indicators in this mode require mathematical methods adequate at long -term temporary intervals, which is considered in present paper.

**Keywords:** mass finishing, thin-walled pipe, elastic-mass system, movement stabilization.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Ushakov A. S.. O proizvodstve stalnyh trub/A.S. Ushakov, L.A. Kondratov //Stal, 2018, №. 7, S. 33-43.
2. Klubovich V.V. Tehnologii obrabotki tonkostennyh trub postojannogo i peremennogo profilja/ V.V. Klubovich, V.A. Tomilo, V.V. Levkovich// Metallurgija: respublikanskij mezhdromstvennyj sbornik nauchnyh trudov / redkol.: I. A. Ivanov (gl. red) [i dr.]. – Minsk: BNTU, 2019. – vyp. 40. – s. 203 –212.
3. Tomilo V.A. Rotacionnoe vydavlivanie pri obrabotke tonkostennyh trub/V.A. Tomilo, V.V. Levkovich//Novye materialy i tehnologii: poroshkovaja metallurgija, kompozicionnye materialy, zashhitnye pokrytiya, svarka, 2022 – s. 725 – 730.
4. Lavrentev A.M. Issledovanie processa rotacionnogo obkatyvaniya dlinnyh tonkostennyh trub/A.M. Lavrentev// Sovremennye naukoemkie tehnologii, 2020.. – vyp. 7 – s. 73 – 77.
- 5 Nemenko A.V. Linejnaja rekonstrukcija polozhenija kontroliruemogo objekta/A.V. Nemenko, M.M. Nikitin//Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii, 2020, №4-2(342), S.136 – 140.
6. Nemenko A.V. Prognoznaja ocenka parametrov teplovogo polja sudovojo jenergeticheskoy ustanovki/ A.V. Nemenko, M.M. Nikitin// Vestnik SevNTU. Ser. Mehanika, jenergetika, jekologija: sb. nauch. tr. – Sevastopol, 2014. – vyp. 148 – s. 207 – 210.
7. Nemenko A.V. Dalmij prognoz jekspluatacionnoj nadezhnosti proizvodstvennoj sistemy/A.V. Nemenko, M.M. Nikitin//Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii, 2022, №4(354),s.58 - 64.

**Nemenko Aleksandra Vasilyevna**

Federal State Autonomous Educational Foundation «Sevastopol State University», Sevastopol  
Ph.D., docent of chair«Digital design »  
299053, Sevastopol, ul. Universitetskaya, 33  
Ph.:+79788330519  
E-mail:valesan@list.ru

**Nikitin Mikhail Mikhaylovich**

Federal State Autonomous Educational Foundation «Sevastopol State University», Sevastopol  
Senior lecturer of chair «Higher Mathematics»  
299053, Sevastopol, ul. Universitetskaya, 33  
Ph.:+79788150316  
E-mail: m.nikitin.1979@gmail.com

ДЕМЕНТЬЕВ К.В., ПОЛЯКОВ А.М., ПАХАЛЮК В.И., ЛАЗАРЕВ В.Б.

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ ЛИНЕЙНЫМ ПРИВОДОМ МЕХАТРОННОГО СТЕНДА-СИМУЛЯТОРА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ НА ИЗНОС ТОТАЛЬНЫХ ПРОТЕЗОВ КОЛЕННОГО СУСТАВА

**Аннотация.** Статья посвящена разработке системы управления высокоскоростными линейными приводами мехатронного стенда-симулятора для испытаний на износ тотальных протезов коленного сустава согласно ГОСТ Р ИСО 14243-1-2012. Ключевыми элементами системы являются серво-шаговый двигатель 57HSE2N-D25 и микроконтроллер STM32, обеспечивающий управление приводом посредством подачи импульсных сигналов с заданной частотой. Для отслеживания точности перемещений используется инкрементальный энкодер, данные которого поступают в систему телеметрии. В статье подробно рассмотрены схемы взаимодействия компонентов, включая использование нескольких приводов, что позволяет достигать высокой точности и надежности воспроизведения движений и нагружения испытуемых образцов.

**Ключевые слова:** мехатронный стенд, линейный привод, система управления, тотальный протез коленного сустава, износ.

### Введение

В современных условиях стремительного развития медицинских технологий особое внимание уделяется совершенствованию эндопротезирования крупных суставов, и, в том числе, коленных суставов. Одним из ключевых аспектов успеха таких хирургических операций является устойчивость материалов пар трения эндопротезов к износу, что напрямую влияет на их долговечность.

Требования к испытаниям на износ тотальных протезов коленного сустава регламентированы ГОСТ Р ИСО 14243-1-2012. Учитывая тот факт, что испытуемые образцы протезов, согласно этим требованиям, должны нагружаться и совершать пространственные движения по сложным периодическим законам с частотой 1 Гц, испытания на износ необходимо проводить на специализированных стендах-симуляторах, способных имитировать реальные нагрузления и движения элементов естественного сустава в условиях *in vitro*.

В данной статье рассматривается разработка системы управления (далее – СУ) высокоскоростными линейными приводами мехатронного стенда-симулятора для испытаний на износ тотальных протезов коленного сустава, обеспечивающими передне-заднее смещение (силу) и поворот (момент) большеберцового компонента протеза в процессе испытаний. Центральным элементом СУ является серво-шаговый двигатель 57HSE2N-D25, интегрированный с микроконтроллером семейства STM32. Управление двигателем осуществляется посредством подачи импульсов с заданной частотой, что обеспечивает необходимую точность и стабильность движения приводного механизма. Для мониторинга и обратной связи используется инкрементальный энкодер, обеспечивающий телеметрию текущего положения и скорость привода.

В данной статье подробно рассматривается схема взаимодействия основных компонентов СУ, включая механические и электронные элементы, а также алгоритмы управления. Особое внимание уделяется особенностям использования нескольких приводов в одном испытательном стенде, что позволяет имитировать многовекторные нагрузки и более точно моделировать реальные условия эксплуатации протезов. Кроме этого, обсуждаются вопросы синхронизации приводов и обеспечения надежности СУ в целом.

Предлагаемая СУ высокоскоростными линейными приводами способствует повышению точности и эффективности испытаний искусственных суставов, что, в свою очередь, способствует созданию более надежных и долговечных эндопротезов. Представленные решения и подходы могут быть использованы в качестве основы для дальнейших исследований и разработок в области мехатроники и биомедицинской инженерии.

### Основная часть

За основу линейного привода взят модуль с рельсом/кареткой с рабочим диапазоном движения 0.2 м и серво-шаговый двигатель 57HSE2N-D25, характеристики которого приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики серво-шагового двигателя 57HSE2N-D25

Параметр	Величина
Число фаз	2
Фланец, мм	57 (NEMA 23)
Угловой шаг	1,8°
Ток, А	4,2
Сопротивление/ фаза, Ом	0,5
Индуктивность/фаза, мГн	1,8
Момент удержания, Нм	2,0
Диаметр вала, мм	8,0
Длина двигателя (с энкодером), мм	96
Разрешение энкодера, имп/об	1000
Рабочая температура (max), °C	80
Температура окружающей среды, °C	-20°C ~ +50°C

Конструктивные особенности серво-шагового двигателя 57HSE2N-D25:

- ток фазы: 4,2 А;
- количество фаз: 2;
- диаметр вала: 8 мм;
- макс. скорость: 2000 об/мин;
- номинальная скорость: 1000 об/мин;
- максимально крутящий момент: 2 Нм;
- угол шага: 1,8° (точность: ± 5%);
- погрешность сопротивления: ± 10%;
- максимальная температура: 80° С;
- рабочий диапазон температур: от -20° С до +50° С;
- диэлектрическая стойкость: 500 ВАС в одну минуту;
- радиальное биение вала: 0,02 мм (при нагрузке 450 г);
- осевое биение вала: 0,08 мм (при нагрузке 450 г);
- разрешение энкодера: 1000 PRR;
- длина мотора: 76 мм;
- вес: 1,15 кг.

При одном полном обороте двигателя каретка перемещается на 5 мм. Управление при этом формируется серводрайвером HSS57, обеспечивающим стабильную и точную работу двигателя без потери шагов. Быстрая реакция и отсутствие «рысканий» делают его идеальным вариантом для приложений, которые требуют быстрого передвижения объектов на короткие расстояния и в которых неравномерная работа является нежелательной. Например, в механизмах с ременной передачей или в других механизмах с низкой жесткостью, при остановке шагового двигателя необходимо обеспечивать низкую вибрацию.

Особенности драйвера HSS57:

- драйвер HSS57 подходит для NEMA 23, 24 (с крутящим моментом 2,2 – 3,0 Нм) замкнутого цикла шагового двигателя;
- исключена возможность потери шагов;
- обеспечивает плавную работу двигателя, низкую вибрацию, гарантирует высокие динамические характеристики при ускорении и торможении двигателя;
- отсутствие вибрации при изменении скорости от нулевого до максимального значения;
- наличие автоматической регулировки тока в зависимости от нагрузки;
- уменьшение крутящего момента при увеличении скорости значительно ниже, чем у обычного шагового двигателя;
- частота: до 200 кГц;
- микрошаг: 16, максимум 51200 имп/об;
- напряжения: DC 24V ~ 50V;
- максимальный ток – 6 А;
- входной ток: 7~20 mA;
- разрешение энкодера: 1000 PRR;
- сопротивление изоляции: >= 500 МΩ;
- рабочая температура: 0~50° С;

- рабочая влажность: 40~90% RH;

Преимущества использования привода с серво-шаговым двигателем:

- интеграция двигателя и винта уменьшает общий размер и сложность системы;
- высокая точность и повторяемость движения за счет прямого привода;
- простота в использовании и настройке.

Разрешение энкодера в 1000 импульсов на оборот, позволяет позиционировать каретку с точностью 0,005 мм на один приходящий импульс, что обеспечивает высокую точность перемещения.

Комплект серво-шагового двигателя и драйвера показан на рисунке 1.

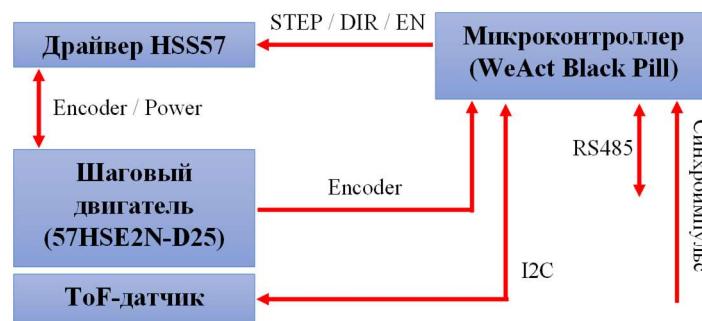


*Рисунок 1 – Комплект 57HSE2N-D25 и HSS57*

В качестве контроллера привода используется плата WeAct Black Pill V1.2 на базе STM32F401CCU6. Ее основные характеристики:

- ядро: ARM Cortex-M4;
- тактовая частота: до 84 MHz;
- флэш-память: 256 KB;
- ОЗУ: 64 KB;
- USB: Micro USB (поддерживает USB OTG);
- USART: несколько интерфейсов UART/USART;
- SPI: поддерживает несколько интерфейсов SPI;
- I2C: поддержка нескольких интерфейсов I2C;
- CAN: контроллер CAN (Controller Area Network);
- 26 доступных пользовательских pinов ввода-вывода;
- поддержка аналоговых входов (ADC);
- поддержка цифровых входов-выходов (GPIO);
- поддержка прерываний;
- низкое энергопотребление благодаря архитектуре STM32;
- поддержка режимов сна и глубокого сна для экономии энергии;
- напряжение питания: 3.3V – 5V.

Структурная схема подключения устройств системы линейного привода приведена на рисунке 2.



*Рисунок 2 – Структурная схема подключения устройств привода*

Показанный на схеме (рисунок 2) ToF-датчик обеспечивает поиск начального положения каретки посредством усреднения 64 измерений дальности (в настоящей работе использовался датчик VL6180X). При этом позиционирование обеспечивается инкрементальным энкодером шагового двигателя, а управление положением обеспечивается драйвером, управляемым микроконтроллером посредством изменения частоты импульсов и сигнала направления в соответствующих каналах. Для поддержки нескольких приводов в единой системе используется синхроимпульс, разрешающий рабочий цикл.

За алгоритмическую основу программы микроконтроллера была взята схема перехода состояний, показанная на рисунке 3. Список команд оператора, доступных при этом, приведен в таблице 2. В качестве среды разработки была использована открытая платформа PlatformIO.

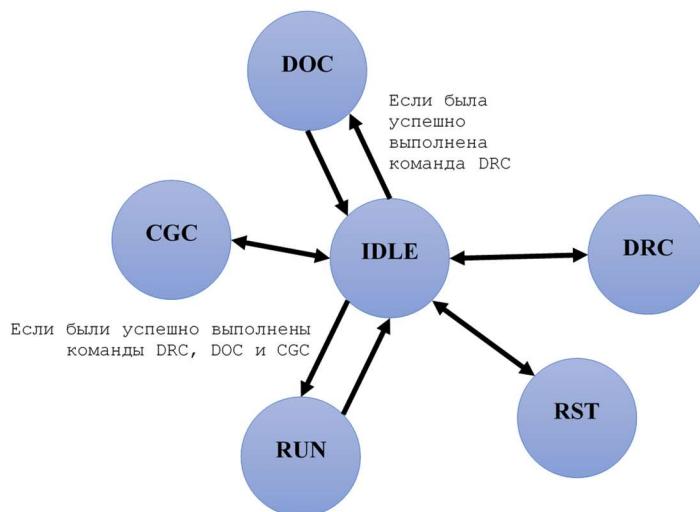


Рисунок 3 – Граф состояний

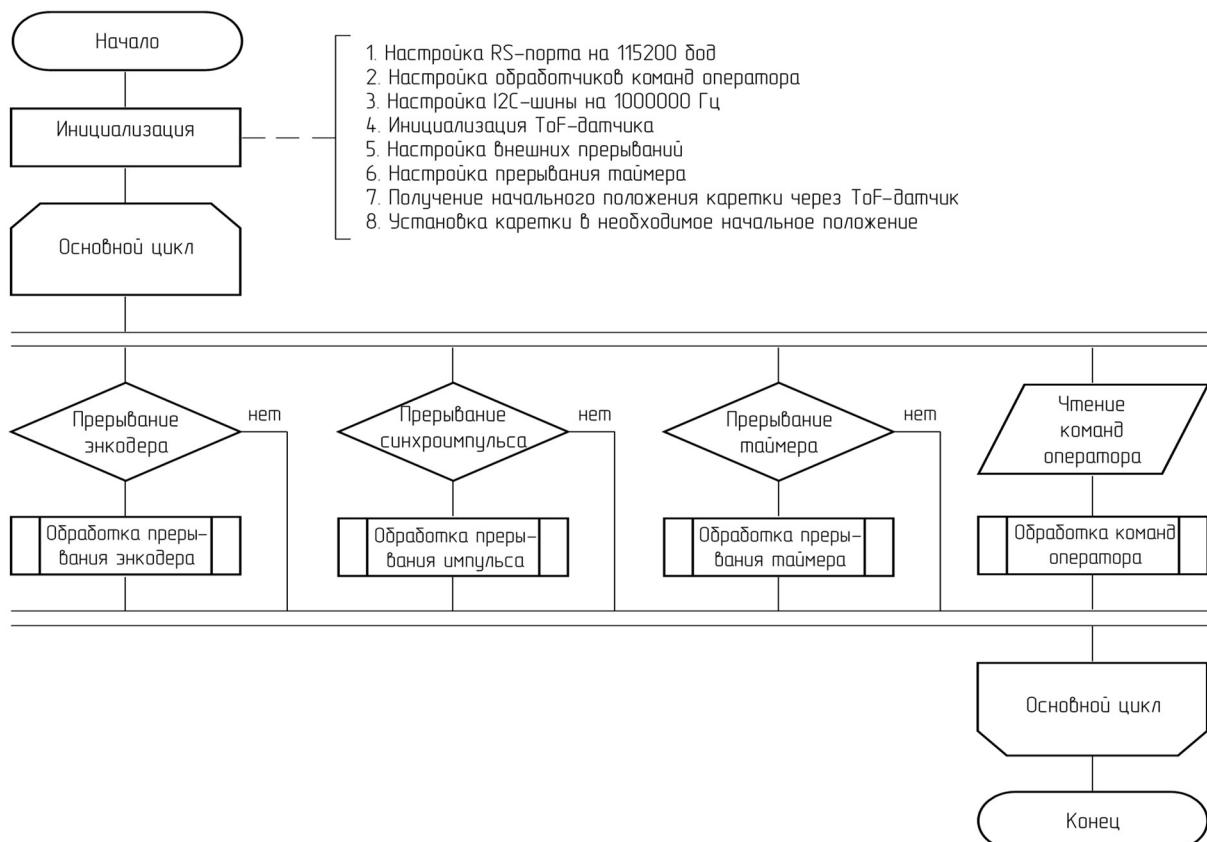


Рисунок 4 – Блок-схема основной части программы

При разработке программного обеспечения использовался ряд открытых библиотек, среди которых: библиотека для работы с ToF-датчиками [2], библиотека для обработки пользовательских команд [3] и библиотека для управления шаговыми двигателями [4].

Блок-схема основной части программы приведена на рисунке 4. Здесь для взаимодействия пользователя с программой используется механизм ввода команд, который асинхронно используется с каналом вывода телеметрии.

Блок-схема процедуры «Обработка прерывания энкодера» приведена на рисунке 5. Здесь определяется текущее положение центра каретки для дальнейшего вывода телеметрии. При этом требуется начальное значение, определяемое при инициализации системы посредством ToF-датчика.

Для обработки синхроимпульса используется механизм прерываний, в обработчике которых прописана установка флага разрешения. Блок-схема процесса обработки прерывания импульса показана на рисунке 6.

Процесс вывода телеметрии и формирования управления обеспечивается прерыванием первого таймера микроконтроллера, алгоритм которого представлен в виде блок-схемы на рисунке 7.

В этой статье в качестве тестового примера рассматривается движение каретки с большеберцевым компонентом протеза в передне-заднем направлении по закону, циклографма которого задана по 100 ключевым точкам согласно ГОСТ Р ИСО 14243-1-2012 и показана на рисунке 8.

График ошибок, полученный в результате эксперимента по отработке движения каретки показан на рисунке 9. Легко заметить, что СУ отрабатывает уставку за короткий промежуток времени.

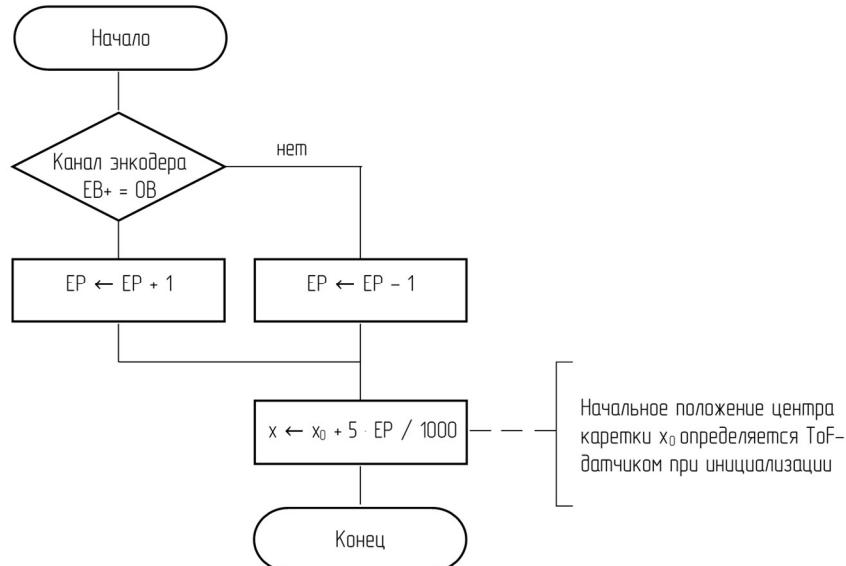
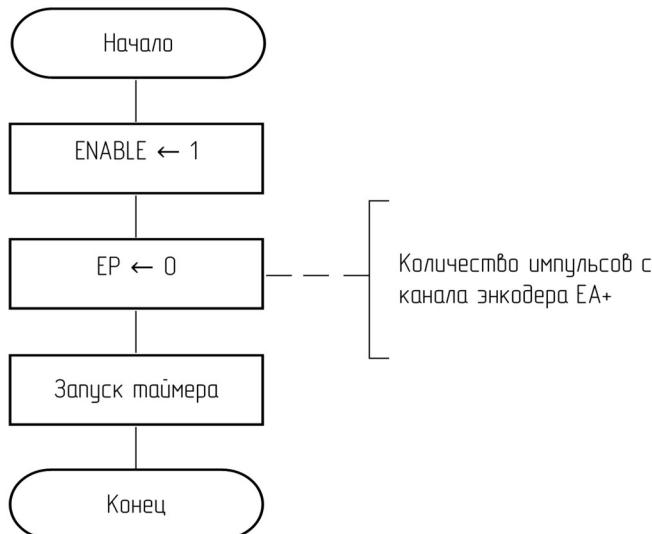


Рисунок 5 – Блок-схема процедуры «Обработка прерывания энкодера»

### Заключение

Представленная в этой работе СУ высокоскоростными линейными приводами мехатронного стенда-симулятора для испытаний на износ тотальных протезов коленного сустава отвечает требованиям точности и надежности исполнительных механизмов, регламентированным ГОСТ Р ИСО 14243-1-2012. Использование серво-шагового двигателя в связке с микроконтроллером семейства STM32 позволило реализовать управление посредством подачи импульсов с заданной частотой, что обеспечило стабильное и точное движение приводных механизмов. Интеграция инкрементального энкодера обеспечила эффективный мониторинг текущего положения и скорости приводов, обеспечивая необходимую телеметрию для обратной связи.

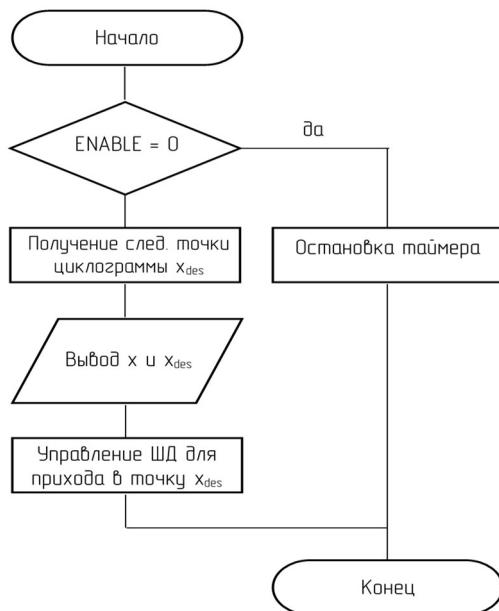
Схема взаимодействия компонентов разработанной СУ демонстрирует высокую степень интеграции механических и электронных элементов, а особенности использования нескольких приводов позволили более точно имитировать многовекторные нагрузки, характерные для реальных условий эксплуатации тотальных протезов коленного сустава.



*Рисунок 6 – Блок-схема процедуры «Обработка прерывания импульса»*

Таблица 2 – Команды и описание параметров

Название	Команда и параметры
DOC: Docking (установка центра каретки)	DOC [float] желаемое положение центра каретки (мм)
CGC: Cyclogram Configuration (настройка циклограммы)	CGC [float] [float] ... [float] значения циклограммы (мм) – длит. 1 сек
DRC: Driver Configuration (настройка драйвера)	DRC [unsigned int] кол-во импульсов драйвера на оборот
RUN: Run (запуск рабочего цикла)	RUN
RST: Reset (перезапуск системы)	RST



*Рисунок 7 – Блок-схема процедуры «Обработка прерывания таймера»*

Натурные эксперименты подтвердили, что представленная СУ способна обеспечивать уставку положения каретки с минимальной ошибкой, что свидетельствует о высокой точности и надежности принятых решений.

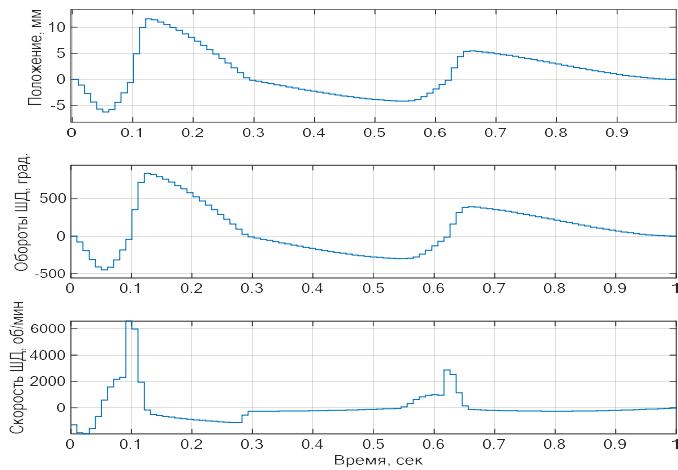


Рисунок 8 – Циклограмма движения каретки

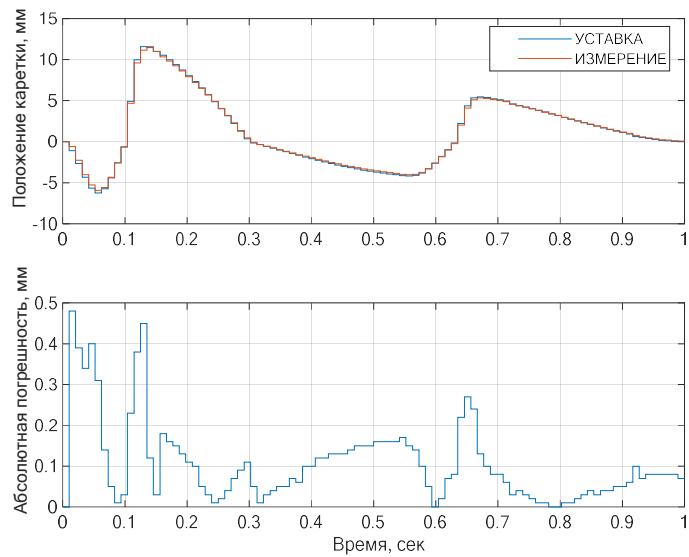


Рисунок 9 – Ошибка позиционирования

Данная работа открывает перспективы для дальнейших исследований и улучшений в области мехатронных систем испытаний биомедицинских изделий. В частности, возможным направлением развития является оптимизация алгоритмов управления для повышения динамических характеристик системы, а также расширение функциональности стендов-симуляторов в целом за счет интеграции дополнительных сенсоров и средств диагностики. Внедрение разработанной СУ в производственные процессы испытаний эндопротезов суставов может значительно повысить качество и долговечность медицинских изделий, способствуя улучшению их износостойкости и, следовательно, качества жизни пациентов.

Таким образом, разработанная СУ высокоскоростным линейным приводом представляет собой эффективное решение для механических испытаний тотальных протезов коленного сустава на износ, обеспечивая необходимую точность, устойчивость к нагрузкам и надежность работы, что является важным шагом на пути к совершенствованию процессов моделирования работы изделий медицинского назначения в условиях *in vitro*.

*Данная работа выполнена в рамках проекта "Разработка мехатронного стенда-симулятора для испытаний на износ тотальных протезов коленного сустава", реализуемого за счет средств Гранта ФСИ Старт-1: Договор №5077ГС1/89642 от 07.11.2023 г.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р ИСО 14243-1-2012 Имплантаты для хирургии. Износ тотальных протезов коленного сустава. Часть 1. Параметры нагружения и перемещения для испытательных машин с контролем нагрузки и окружающих условий при испытании. М., 2013. 19 с. Стандартинформ
2. VL6180X // GitHub URL: <https://github.com/pololu/vl6180x-arduino> (дата обращения: 01.09.2024).

3. SerialCommands // GitHub URL: <https://github.com/ppedro74/Arduino-SerialCommands> (дата обращения: 01.09.2024).

4. StepperDriver // GitHub URL: <https://github.com/laurb9/StepperDriver> (дата обращения: 01.09.2024).

**Дементьев Кирилл Валерьевич**

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,  
ассистент кафедры «Информатика и управление в  
технических системах», младший научный  
сотрудник лаборатории «Робототехника и  
интеллектуальные системы управления»,  
ул. Университетская 33, г. Севастополь, 299053  
Тел. +7 978 847 37 49

**Пахалюк Владимир Иванович**

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный  
университет»,  
канд. техн. наук, доцент, ведущий научный  
сотрудник научной лаборатории «Биомеханика»,  
ул. Университетская 33, г. Севастополь, 299053  
Тел. +7 978 764 06 00  
E-mail: pahaluk@mail.sevsu.ru

**Поляков Александр Михайлович**

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный  
университет»,  
канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник  
научной лаборатории «Биомеханика»,  
ул. Университетская 33, г. Севастополь, 299053  
Тел. +7 978 703 88 26  
E-mail: a.m.poljakov@mail.sevsu.ru

**Лазарев Виктор Борисович**

Общество с ограниченной ответственностью  
"Автономные роботизированные системы"  
Директор  
г. Севастополь  
Тел. +7 978 691 35 71  
E-mail: lvb69@yandex.ru

DEMENTIEV K.V., POLIAKOV A.M., PAKHALIUK V.I., LAZAREV V.B.

**DEVELOPMENT OF HIGH-SPEED LINEAR DRIVE CONTROL SYSTEM  
FOR MECHATRONIC WEAR TEST STAND FOR KNEE JOINT  
ENDOPROSTHESES**

**Abstract.** The article focuses on the control system development for high-speed linear actuator of the mechatronic knee joint endoprosthesis wear test bench. The key elements of the system are a servo-stepper motor and STM32 microcontroller, which provides actuator control by supplying pulse signals with a given frequency. An incremental encoder is used to track the displacement accuracy and its data is fed into the telemetry system. The article details the components interaction schemes, including multiple actuators case, which allows to achieve high accuracy and reliability of test loads reproduction.

**Keywords:** linear actuator, control system, mechatronic bench, endoprosthesis wear.

**BIBLIOGRAPHY**

1. ГОСТ Р ИСО 14243-1-2012 Имплантаты для хирургии. Износ тотальных протезов коленного сустава. Часть 1. Параметры нагружения и перемещения для испытательных машин с контролем нагрузки и окружающих условий при испытании. М., 2013. 19 с. Стандартинформ.
2. VL6180X // GitHub URL: <https://github.com/pololu/vl6180x-arduino> (01.09.2024).
3. SerialCommands // GitHub URL: <https://github.com/ppedro74/Arduino-SerialCommands> (01.09.2024).
4. StepperDriver // GitHub URL: <https://github.com/laurb9/StepperDriver> (01.09.2024).

**Dementiev Kirill Valeriyevich**

FSAEI HE “Sevastopol State University”,  
Department assistant, Junior researcher,  
Universitetskaya Str. 33, Sevastopol, 299053  
Тел. +7 978 885 74 79  
E-mail: mash.saigon.89@gmail.ru

**Poliakov Aleksandr Mikhaylovich**

FSAEI HE “Sevastopol State University”,  
Ph.D., Associate Professor, Leading researcher of the  
“Biomechanics” research laboratory,  
Universitetskaya Str. 33, Sevastopol, 299053  
Phone: +7 978 703 88 26  
E-mail: a.m.poljakov@mail.sevsu.ru

**Pakhaliuk Vladimir Ivanovich**

FSAEI HE “Sevastopol State University”,  
Ph.D., Associate Professor, Leading researcher of the  
“Biomechanics” research laboratory,  
Universitetskaya Str. 33, Sevastopol, 299053  
Phone: +7 978 764 06 00  
E-mail: pahaluk@mail.sevsu.ru

**Lazarev Victor Borisovich**

Limited Liability Company  
"Autonomous Robotic Systems"  
Director Sevastopol  
Phone: +7 978 691 35 71  
E-mail: lvb69@yandex.ru

*Адрес издателя:*

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»  
302026, Орловская область, г. Орёл, ул. Комсомольская, 95  
Тел. (4862) 75–13–18  
<http://oreluniver.ru>  
E-mail: [info@oreluniver.ru](mailto:info@oreluniver.ru)

*Адрес редакции:*

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»  
302030, Орловская область, г. Орёл, ул. Московская, 34  
+7 (905) 169 88 99

<https://oreluniver.ru/science/journal/fippt>  
E-mail: [radsu@rambler.ru](mailto:radsu@rambler.ru)

Материалы статей печатаются в авторской редакции

Право использования произведений предоставлено авторами на основании  
п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации

Технический редактор Тюхта А.В.  
Компьютерная верстка Тюхта А.В.

Подписано в печать 29.11.2024 г.  
Дата выхода в свет 16.12.2024 г.  
Формат 70Х108/16. Усл. печ. л. 12  
Цена свободная. Тираж 1000 экз.  
Заказ № 278

Отпечатано с готового оригинал–макета  
на полиграфической базе ОГУ имени И.С. Тургенева  
302026, Орловская область, г. Орёл, ул. Комсомольская, д. 95