

ISSN 2073-7408

# ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО - ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2 (364) 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)

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

Зубянинов 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)

Мирсалимов 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)

Распопов 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)

Создакин 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)

Хейфец 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/fipptt>

E-mail: [radsu@rambler.ru](mailto: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

Подписной индекс **29504**

по объединенному каталогу

«Пресса России»

на сайтах [www.ppressa-ru.ru](http://www.ppressa-ru.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 технологии» как издание,  
входящее в международную базу данных  
Chemical Abstracts, приравнивается к  
изданиям категории K1.

## Содержание

### Механика деформируемого твердого тела, динамика и прочность

Поддубный А.А., Гордон В.А., Семенова Г.А. Модель прогрессирующего разрушения  
системы «балка-основание»..... 3

### Машиностроительные технологии и оборудование

Неменко А.В., Никитин М.М. Влияние механической обработки деталей машин на их  
эксплуатационные характеристики..... 12

Братан С.М., Покинтелица Н.И., Якубов Ч.Ф., Часовитина А.С. Методика  
математического описания оценки геометрии инструмента с учетом  
теплофизических параметров..... 18

Кожус О.Г., Барсуков Г.В., Журавлева Т.А., Прасолов Е.А., Петрухин А.В., Бондаренко М.Э.  
Повышение производительности гидроабразивного резания за счет модификации  
турбулентного пограничного слоя в канале сопла..... 24

Неменко А.В., Никитин М.М. Финишная обработка обтекателя судового гребного  
винта..... 32

### Машиноведение и мехатроника

Корнеев А.Ю., Мищенко Е.В. Развитие Орловской научной школы  
гидродинамической теории смазки..... 38

Чернышев В.И., Фоминова О.В. Системы управления: теоретические аспекты  
управляемости джостом..... 52

Чжоу Инчунь, Кислов С.В., Ли Шэнбо, Ху Джиган, Поляков Р.Н., Савин Л.А.  
Триботехнические качества поверхностей трения с минеральными покрытиями..... 64

Фетисов А.С., Левых П.И. Динамические характеристики магнитореологических  
демпферов сжатия..... 72

Родичев А.Ю., Горин А.В. Исследование и оценка технического состояния  
подшипников скольжения с антифрикционным твердосмазочным покрытием в  
процессе приработки..... 79

Горин А.В., Поляков Р.Н., Внуков А.В., Родичева И.В., Преснецова В.Ю.  
Экспериментальные исследования технического состояния бесконтактных  
уплотнений в роторно-опорных узлах..... 88

Корнеев А.Ю., Сытин А.В., Серебренников А.Д., Сухоручко А.В. Особенности расчета  
конических лепестковых подшипников при смазке неомом..... 97

Бондаренко М.Э., Поляков Р.Н., Серебренников А.Д., Смирнова К.В.  
Экспериментальные исследования активных комбинированных опор..... 106

Бондаренко М.Э., Родичев А.Ю., Смирнова К.В., Родичева И.В., Васильев К.В. Влияние  
твердых антифрикционных покрытий на коэффициент трения в опорах  
скольжения..... 114

### Приборы, биотехнические системы и технологии

Пушкарева А.В. Сжатие биомедицинских сигналов в телемедицинских системах..... 124

Дологоляна А.В., Матвеев В.Т., Клименко А.Г. Характеристики солнечных  
гибридных микрогазотурбинных установок на частичных нагрузках при  
различных способах нагружения..... 130

Гайнуллина Я.Н., Калинин М.И., Сопин П.К. Исследование устойчивости элементов  
глубоководных систем жидкостного дыхания в заданных условиях эксплуатации... 148

Абрамов А.В., Сурженко Е.Я., Кургузов В.В., Родичева М.В. Цифровой и  
функциональный двойники экспериментальной установки..... 155

Паришкова В.Е., Жарких Е.В., Локтионова Ю.И., Коськин А.В., Дунаев А.В. Исследование  
физиологического разбора параметров микроциркуляторно-тканевых систем организма  
человека с помощью мультимодальных портативных анализаторов..... 165

### Контроль, диагностика, испытания и управление качеством

Ушаков М.В., Воробьев И.А., Никольский С.М. Стратегия контроля параметров  
зубчатых колес на КИМ..... 177

Давыдова Н.В., Иванов Ю.Н., Одинцов Н.А., Палеев В.И. Предложение по  
укомплектованию измерительным оборудованием автоматизированной системы  
контроля состояния волоконно-оптической линии связи с учётом факторов

указывающих на несанкционированный доступ к данным..... 182

Филипович О.В., Балакина Н.А., Балакин А.И. Модификация метода анализа влияния  
погрешностей измерения на показатели селективной сборки двух элементов путем  
применения многократных измерений..... 192

Журнал входит в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» ВАК по следующим группам научных специальностей:

2.2.4. Приборы и методы измерения (по видам измерений) (технические науки), 2.2.5. Приборы навигации (технические науки), 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды (технические науки), 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы (технические науки), 2.2.12. Приборы, системы и изделия медицинского назначения (технические науки), 2.5.2. Машиноведение (технические науки), 2.5.3. Трение и износ в машинах (технические науки), 2.5.4. Роботы, мехатроника и робототехнические системы (технические науки), 2.5.5. Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки), 2.5.6. Технология машиностроения (технические науки), 2.5.7. Технологии и машины обработки давлением (технические науки), 2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства (технические науки).

## 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)

Smolenzev V.P. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

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

Starovoitov A.L. 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/fipptt>

E-mail: [radsu@rambler.ru](mailto: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-ru](http://www.pressa-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

### Mechanics of deformable solids, dynamics and strength

- Poddubny A.A., Gordon V.A., Semenova G.A. Dynamic system response "beam – two-parameter foundation" for sudden crack formation..... 3

### Machine-building technologies and equipment

- Nemenko A.V., Nikitin M.M. Influence of machine parts mechanical processing on their operational characteristics..... 12
- Bratan S.M., Pokintelitsa N.I., Yakubov Ch.F., Chasovitina A.S. The method of mathematical description of the evaluation of the geometry of the tool considering the thermophysical parameters..... 18
- Kozhus O.G., Barsukov G.V., Zhuravleva T.A., Prasolov E.A., Petrukhin A.V., Bondarenko M.E. Increased waterjet cutting productivity due to turbulent modification boundary layer in the nozzle channel..... 24
- Nemenko A.V., Nikitin M.M. Finishing of the ship's propeller fairing ..... 32

### Machine Science and Mechatronics

- Korneev A.Yu., Mishchenko E.V. The development of the Oryol scientific school of the hydrodynamic lubrication theory ..... 38
- Chernyshev V.I., Fominova O.V. Control systems: theoretical aspects of controllability ..... 52
- Zhou Yinchun, Kislov S.V., Li Shengbo, Hu Zhigang, Polyakov R.N., Savin L.A. Tribotechnical properties of friction surfaces with mineral coatings..... 64
- Fetisov A.S., Levih P.I. Dynamic characteristics of magnetorheological squeeze dampers... 72
- Rodichev A.Yu., Gorin A.V. Research and assessment of the technical condition of sliding bearings with anti-friction solid-lubricant coating during the breaking-in process..... 79
- Gorin A.V., Polyakov R.N., Vnukov A.V., Rodicheva I.V., Presnetsova V.Yu. Experimental studies of the technical condition of non-contact seals in rotor-support assembly ..... 88
- Korneev A.Yu., Sytin A.V., Serebrennikov A.D., Sukhoruchko A.V. Calculation features of taped lope bearings with neon lubrication..... 97
- Bondarenko M.E., Polyakov R.N., Serebrennikov A.D., Smirnova K.V. Experimental research on dynamic characteristics of the rotor in active hybrid bearings ..... 106
- Bondarenko M.E., Rodichev A.Yu., Smirnova K.V., Rodicheva I.V., Vasilyev K.V. Influence of solid anti-friction coatings on the friction coefficient in the sliding bearings..... 114

### Devices, biotechnical systems and technologies

- Pushkareva A.V. Compression of biomedical signals in telemedical systems..... 124
- Dologlonyan A.V., Matvienko V.T., Klimenko A.G. Characteristics of solar hybrid micro gas turbine plants at partial loads under different loading methods..... 130
- Gainullina Ya.N., Kalinin M.I., Sopin P.K. Investigation of the stability of elements of deep-sea liquid respiration systems under specified operating conditions..... 148
- Abramov A.V., Surzhenko E.Ya., Kurguzov V.V., Rodicheva M.V. Digital and functional twins of an experimental installation for assessing the dust permeability of miner's clothing materials..... 155
- Parshakova V.E., Zharkikh E.V., Loktionova Yu.I., Koskin A.V., Dunaev A.V. Study of physiologic variability of microcirculatory-tissue systems parameters of human organism using multimodal portable analyzers..... 165

### Monitoring, Diagnostics, Testing and Quality Management

- Ushakov M.V., Vorobyov I.A., Nikolsky S.M. The strategy of controlling the parameters of gears on the CMM..... 177
- Davydova N.V., Ivanov Yu.N., Odintsov N.A., Paleev V.I. Proposal to complete the automated fiber optic link monitoring system with measuring equipment taking into account factors indicating unauthorized access to data ..... 182
- Filipovich O.V., Balakina N.A., Balakin A.I. Modification of the method for analyzing the influence of measurement errors on the indicators of selective assembly of two elements by applying multiple measurements..... 192

The journal is included in the «List of peer-reviewed scientific publications in which the main scientific results of dissertations for obtaining the scientific degree of the candidate of sciences, for the academic degree of the doctor of sciences» of the Higher Attestation Commission for the following groups of scientific specialties: 2.2.4. Instruments and measurement methods (by types of measurements) (technical sciences), 2.2.5. Navigation devices (technical sciences), 2.2.8. Methods and devices for monitoring and diagnosing materials, products, substances and the natural environment (technical sciences), 2.2.11. Information-measuring and control systems (technical sciences), 2.2.12. Devices, systems and products for medical purposes (technical sciences), 2.5.2. Mechanical engineering (technical sciences), 2.5.3. Friction and wear in machines (technical sciences), 2.5.4. Robots, mechatronics and robotic systems (technical sciences), 2.5.5. Technology and equipment for mechanical and physical-technical processing (technical sciences), 2.5.6. Engineering technology (technical sciences), 2.5.7. Technologies and machines for forming (technical sciences), 2.5.22. Quality control products. Standardization. Organization of production (technical sciences).

# МЕХАНИКА ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА, ДИНАМИКА И ПРОЧНОСТЬ

УДК 539.3

DOI: 10.33979/2073-7408-2024-364-2-3-11

А.А. ПОДДУБНЫЙ, В.А. ГОРДОН, Г.А. СЕМЕНОВА

## МОДЕЛЬ ПРОГРЕССИРУЮЩЕГО РАЗРУШЕНИЯ СИСТЕМЫ «БАЛКА-ОСНОВАНИЕ»

**Аннотация.** В работе представлена математическая модель трёхэтапного статико-динамического процесса в статически нагруженной системе «балка–двухпараметрическое основание Пастернака», инициируемого последовательными внезапными изменениями граничных условий. Исходное рабочее статическое состояние балки с жестко закреплёнными концами преобразуется в изгибные колебания из-за внезапного обрыва связи, препятствующей повороту сечения, в одной из опор, что приводит к перераспределению и росту внутренних усилий и деформаций до величин, превышающих допустимые значения. По этой причине в некоторый момент вынужденных колебаний внезапно образуется сквозная трещина в балке у другой опоры. В результате снова изменяются конструктивная и расчетная схемы системы «балка-основание», изменяются частоты и формы собственных и вынужденных колебаний.

**Ключевые слова:** балка, основание Пастернака, локальные повреждения, колебания, прогрессирующее разрушение.

### Введение

Одной из важных задач строительной механики является разработка способов предотвращения прогрессирующего (лавинообразного) разрушения несущих конструкций, когда быстрые изменения конструктивной и расчётной схем в результате локального повреждения вызывают дополнительные (запроектные) воздействия на сохранившуюся конструкцию и тем самым способствуют дальнейшим повреждениям вплоть до полного разрушения или прекращения штатного функционирования [1, 2].

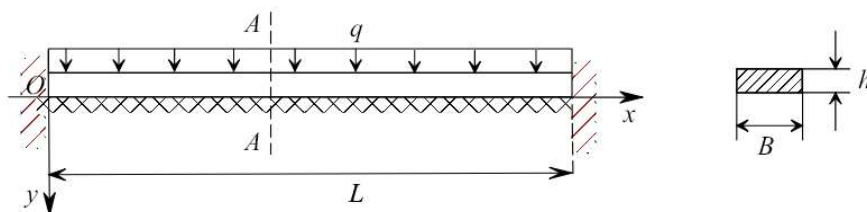


Рисунок 1 – Расчётная схема статического состояния системы «балка-основание»

В настоящей работе рассматривается математическая модель преобразований напряженно-деформированного состояния конструктивно-нелинейной системы «балка-основание Пастернака», обусловленных последовательностью локальных повреждений элементов системы. Предполагается, что по каким-то причинам заделка правого конца внезапно превращается в шарнир, что нарушает статическое равновесное состояние балки, нагруженной равномерно распределённой нагрузкой заданной интенсивности (рисунок 1). Возникают изгибные колебания, приводящие к образованию сквозной трещины в сечении, близком к левой опоре, что, в свою очередь, изменяет характер изгибных колебаний. В результате последовательности указанных локальных повреждений система принимает недопустимое с точки зрения прочности или эксплуатационных возможностей состояние.

### Основная часть

#### 1. Статический изгиб закреплённой по концам балки на упругом основании Пастернака

Статический изгиб балки на упругом двухпараметрическом основании Пастернака под действием равномерно распределённой нагрузки интенсивности  $q$  (рисунок 1) описывается уравнением [1]



$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + K_1 y - K_2 \frac{d^2 y}{dx^2} = q(x) \quad (1)$$

В безразмерных переменных и параметрах

$$\xi = \frac{x}{L}, \quad w = \frac{y}{L}, \quad \alpha = \sqrt[4]{\frac{K_1 L^4}{4EI}}, \quad \beta = \sqrt{\frac{K_2 L^2}{4EI}}, \quad \bar{q} = \frac{qL^3}{EI},$$

где  $x$  – осевая координата,

$y = y(x)$  – прогиб,

$EI$  – изгибная жёсткость балки,

$K_1 = \bar{K}_1 B \left[ \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \right]$ ,  $K_2 = \bar{K}_2 B \text{ [Н]}$  – соответственно изгибная и сдвиговая жёсткость основания,

уравнение (1) приобретает вид

$$w^{IV} - 4\beta^2 w'' + 4\alpha^4 w = \bar{q}. \quad (2)$$

Если обобщённые жёсткости системы «балка-основание»  $\alpha$  и  $\beta$  удовлетворяют условию  $\alpha > \beta$  [4, 5], то решение уравнения (2) имеет вид

$$w = w_0 F_4(\xi) + w'_0 F_3(\xi) + w''_0 F_2(\xi) + w'''_0 F_1(\xi) + F_5(\xi), \quad (3)$$

где коэффициенты уравнения – компоненты вектора начальных параметров  $\bar{w}_0 = \{w_0 \ w'_0 \ w''_0 \ w'''_0\}^T$ ;

$$F_1(\xi) = \frac{1}{2(a^2 + b^2)} \left( \frac{\text{ch } a\xi \sin b\xi}{b} - \frac{\text{sh } a\xi \cos b\xi}{a} \right);$$

$$F_2(\xi) = \frac{1}{2ab} \text{sh } a\xi \sin b\xi;$$

$$F_3(\xi) = \frac{1}{2(a^2 + b^2)} \left( \frac{3a^2 - b^2}{a} \text{sh } a\xi \cos b\xi - \frac{a^2 - 3b^2}{b} \text{ch } a\xi \sin b\xi \right);$$

$$F_4(\xi) = \text{ch } a\xi \cos b\xi - \frac{a^2 - b^2}{2ab} \text{sh } a\xi \sin b\xi;$$

$$F_5(\xi) = \frac{\bar{q}}{4\alpha^4} (1 - F_4(\xi));$$

$$a = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}, \quad b = \sqrt{\alpha^2 - \beta^2}.$$

Удовлетворяя граничным условиям

$$w_0 = w'_0 = 0; \quad w(1) = w'(1) = 0, \quad (4)$$

получаем систему уравнений для определения неизвестных начальных параметров  $w''_0$  и  $w'''_0$

$$F_2(1) w''_0 + F_1(1) w'''_0 = -F_5(1)$$

$$F_6(1) w''_0 + F_7(1) w'''_0 = -F_1(1)$$

и функции статических безразмерных прогибов и изгибающих моментов

$$w_{\text{ст}}(\xi) = F_2(\xi) w''_0 + F_1(\xi) w'''_0 + F_5(\xi), \quad (5)$$

$$M_{\text{ст}}(\xi) = w''_{\text{ст}} = F_7(\xi) w''_0 + F_6(\xi) w'''_0 + F_2(\xi), \quad (6)$$

где  $F_6(\xi) = \frac{1}{2} \left( \frac{\text{ch } a\xi \sin b\xi}{b} + \frac{\text{sh } a\xi \cos b\xi}{a} \right);$

$$F_7(\xi) = \text{ch } a\xi \cos b\xi + \frac{a^2 - b^2}{2a} \text{sh } a\xi \sin b\xi.$$

На рисунке 2 приведены эпюры статических прогибов (5) и изгибающих моментов (6) при нагрузке  $\bar{q} = 1$  и значениях обобщённых параметров жёсткости системы «балка-основание»  $\alpha = 3,6$ ;  $\beta = 1,5$ .

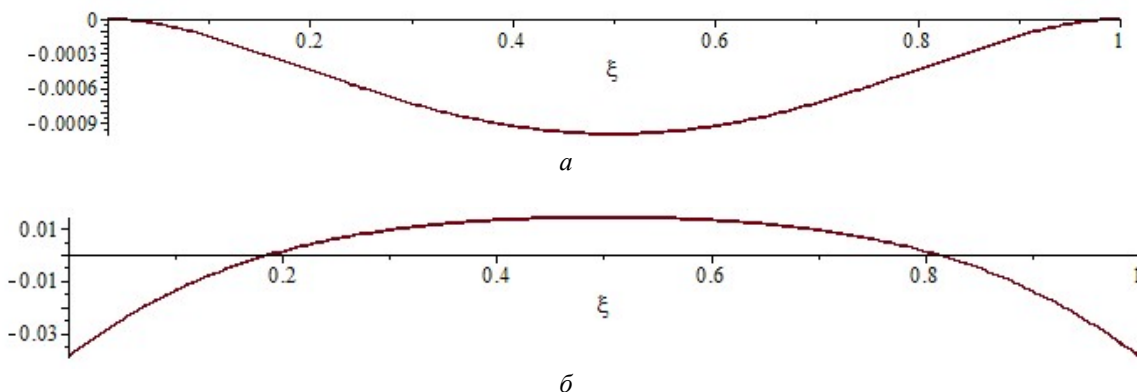


Рисунок 2 – Статические прогиб (а) и изгибающий момент (б)

## 2. Динамический переходный процесс, вызванный внезапным изменением условий закрепления балки

В некоторый момент времени связь в правой ( $\xi = 1$ ) опоре, ограничивающая поворот сечения, внезапно обрывается, например, в результате усталостных процессов, превращая жёсткое защемление в шарнир (рисунок 3).

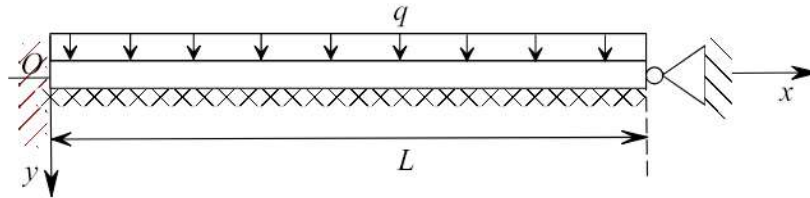


Рисунок 3 – Расчётная схема системы после повреждения правой опоры

Статическое равновесие в результате повреждения нарушается и балка приходит в движение. Поперечные перемещения  $v_{\text{дин}} = v(\xi, \tau)$  сечений балки с новыми граничными условиями

$$v_{\text{дин}}(0, \tau) = v'_{\text{дин}}(0, \tau) = 0; \quad v_{\text{дин}}(1, \tau) = v''_{\text{дин}}(1, \tau) = 0 \quad (7)$$

определяются решением уравнений вынужденных колебаний [1]

$$\frac{\partial^4 v_{\text{дин}}}{\partial \xi^4} - 4\beta^2 \frac{\partial^2 v_{\text{дин}}}{\partial \xi^2} + 4\alpha^4 \left( v_{\text{дин}} + \frac{\partial^2 v_{\text{дин}}}{\partial \tau^2} \right) = \bar{q}. \quad (8)$$

Начальными условиями динамического процесса служат результаты предыдущего раздела

$$v_{\text{дин}}(\xi, 0) = w_{\text{ст}}(\xi); \quad v''_{\text{дин}}(\xi, 0) = M_{\text{ст}}(\xi); \quad \frac{\partial v_{\text{дин}}}{\partial \tau} \Big|_{\xi, 0} = 0; \quad \frac{\partial v''_{\text{дин}}}{\partial \tau} \Big|_{\xi, 0} = 0 \quad (9)$$

2.1 Собственные частоты и формы колебаний балки с закреплённым концом  $\xi = 0$  и шарниром в конце  $\xi = 1$

Полагая колебания балки гармоническими и разделяя переменные в однородном варианте уравнения (8) представлением

$$v(\xi, \tau) = W(\xi) \sin \bar{\omega} \tau, \quad (10)$$

где  $\bar{\omega} = \frac{\omega}{\omega_{01}}$  – безразмерная искомая частота;

$\omega_{01} = \sqrt{\frac{K_1}{\rho A}}$  – условная частота – параметр с размерностью частоты, имеющий

определённый физический смысл, например, частота такой же балки, но свободной (без основания),

получим уравнение для форм собственных колебаний [6]

$$W^{IV} - 4\bar{\omega}_{02}^2 W'' - (\bar{\omega}^2 - \bar{\omega}_{01}^2) W = 0, \quad (11)$$

где  $\bar{\omega} = \frac{\omega}{\omega_3}$  – безразмерная искомая частота колебаний,

$\bar{\omega}_{01} = \frac{\omega_{01}}{\omega_3}$  – безразмерная условная частота,

$\omega_3 = \frac{1}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$  – эталонная частота,

$\bar{\omega}_{02} = \beta$ .

Структура уравнения (11) подразумевает три возможных варианта решения в зависимости от соотношения частот  $\bar{\omega}$  и  $\bar{\omega}_{01}$ . В работе [6] показано, что для балки полностью опёртой на основание Пастернака при условии  $\alpha > \beta$ , возможен единственный вариант соотношения искомой частоты  $\bar{\omega}$  и условной частоты  $\bar{\omega}_{01} = 2\alpha^2 = \sqrt{\frac{K_1}{\rho A}}$ , а именно,

$$\bar{\omega} > \bar{\omega}_{01}.$$

На базе общего решения уравнения (11), полученного в работе [4], построено матричное уравнение, характеризующее состояние произвольного сечения  $\xi$  балки

$$\bar{W}(\xi) = V_1(\xi) \bar{W}_0, \quad (12)$$

где  $\bar{W}(\xi) = \{W_i(\xi) \quad W_i'(\xi) \quad W_i''(\xi) \quad W_i'''(\xi)\}^T$  – вектор состояния произвольного сечения  $\xi$  балки;

$\bar{W}_0 = \{W_0 \quad W_0' \quad W_0'' \quad W_0'''\}^T$  – вектор начальных параметров;

$$V_1(\xi) = \begin{pmatrix} B_4(\xi) & B_3(\xi) & B_2(\xi) & B_1(\xi) \\ (rp)^2 B_1(\xi) & B_4(\xi) & B_5(\xi) & B_2(\xi) \\ (rp)^2 B_2(\xi) & (rp)^2 B_1(\xi) & B_6(\xi) & B_5(\xi) \\ (rp)^2 B_5(\xi) & (rp)^2 B_2(\xi) & B_7(\xi) & B_6(\xi) \end{pmatrix} \quad \text{– функциональная матрица}$$

влияния начальных параметров на состояние сечения  $\xi$  балки;

$$B_1(\xi) = \frac{r \operatorname{sh} p\xi - p \sin r\xi}{rp(r^2 + p^2)}; \quad B_2(\xi) = \frac{\operatorname{ch} p\xi - \cos r\xi}{r^2 + p^2}; \quad B_3(\xi) = \frac{r^3 \operatorname{sh} p\xi + p^3 \sin r\xi}{rp(r^2 + p^2)};$$

$$B_4(\xi) = \frac{r^2 \operatorname{ch} p\xi + p^2 \cos r\xi}{r^2 + p^2}; \quad B_5(\xi) = \frac{p \operatorname{sh} p\xi + r \sin r\xi}{r^2 + p^2}; \quad B_6(\xi) = \frac{p^2 \operatorname{ch} p\xi + r^2 \cos r\xi}{r^2 + p^2};$$

$$B_7(\xi) = \frac{p^3 \operatorname{sh} p\xi - r^3 \sin r\xi}{r^2 + p^2};$$

$$p = \sqrt{2(\sqrt{\beta^4 + \gamma^4} + \beta^2)}; \quad r = \sqrt{2(\sqrt{\beta^4 + \gamma^4} - \beta^2)}; \quad \gamma = \sqrt[4]{\frac{\bar{\omega}^2 - \bar{\omega}_{01}^2}{4}}.$$

Из матричного уравнения (12), удовлетворяя граничным условиям

$$W_0 = W_0' = 0; \quad W(1) = W''(1) = 0, \quad (13)$$

получаем частотное уравнение

$$B_2(1)B_5(1) - B_1(1)B_2(1) = 0, \quad (14)$$

формы собственных колебаний

$$W(\xi) = B_2(\xi) - \frac{B_2(1)}{B_1(1)} B_1(\xi) \quad (15)$$

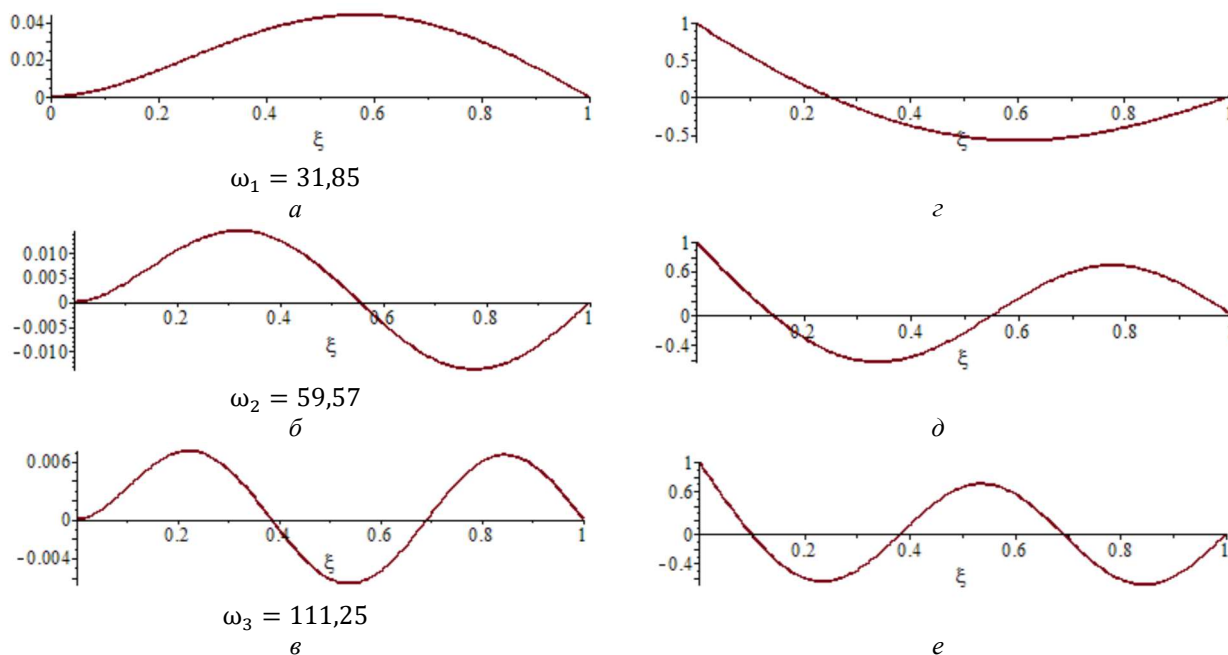
и изгибающих моментов

$$M(\xi) = W''(\xi) = B_6(\xi) - \frac{B_2(1)}{B_1(1)} B_5(\xi), \quad (16)$$

Для принятых ранее значений  $\alpha = 3,6$  и  $\beta = 1,5$  из уравнения (14) определены три первые собственные частоты

$$\omega_1 = 31,85, \quad \omega_2 = 59,57, \quad \omega_3 = 111,25.$$

На рисунке 4 приведены соответствующие этим частотам формы собственных колебаний и изгибающих моментов.



**Рисунок 4 – Формы собственных колебаний:** а – 1ая форма, б – 2ая форма, в – 3я форма) балки и изгибающие моменты, соответствующие формам колебаний (г – 1ая форма, д – 2ая форма, е – 3я форма) после первого повреждения

## 2.2 Вынужденные колебания балки с защемлённым концом $\xi = 0$ и шарниром в конце $\xi = 1$

Динамический прогиб и изгибающий момент исследуются в данном разделе путём разложения внешней нагрузки и начальных статических прогиба и момента в ряды по формам собственных колебаний и моментов повреждённой балки. Алгоритм расчёта вынужденных колебаний аналогичен используемому в работе [7].

На рисунке 5 приводятся графики эпюр прогибов и изгибающих моментов для моментов времени  $\tau = 0, 146, 292, 438, 584$ .

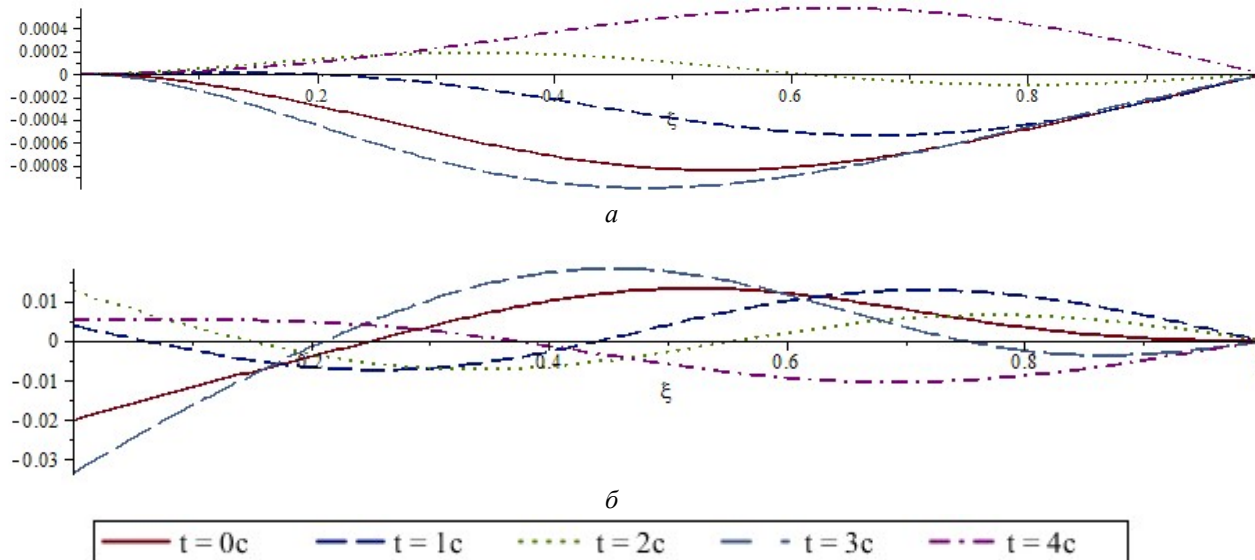


Рисунок 5 – Эпюры прогибов (а) и изгибающие моменты (б) в различные моменты времени после первого повреждения балки

Таким образом, внезапное повреждение правой опоры балки привело балку в движение, вызвало перераспределение внутренних усилий и деформаций, в частности, увеличение изгибающего момента в левой заделке.

В связи с этим фактом, предположим, что нештатное превышение напряжения вызвало образование сквозной трещины в заделке. То есть в очередной раз внезапно изменилась расчётная схема системы «балка-основание»: крепление правого конца  $\xi = 1$  сохранилось прежним, а левый конец балки  $\xi = 0$  стал частично свободным, появилась возможность вертикального движения сечения  $\xi = 0$  при отсутствии поперечной силы  $w'''_{\text{дин}}(0, \tau) = 0$  и наличии изгибающего момента  $w''_{\text{дин}}(0, \tau)$  в этом сечении из-за невозможности поворота сечения (рисунок 6).

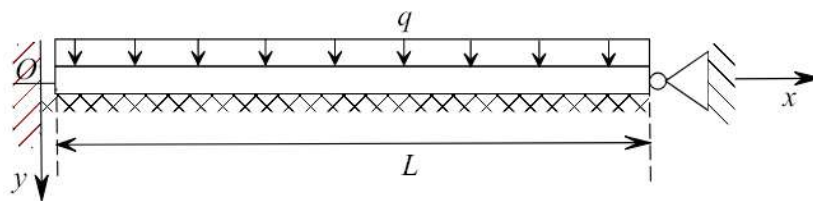


Рисунок 6 – Расчётная схема системы «балка-основание» после образования трещины

В отличие от первого изменения расчётной схемы, когда статическое состояние преобразуется в динамическое, второе внезапное преобразование расчётной схемы системы «балка-основание» означает изменение в момент  $\tau^*$  режима колебаний. С этого момента колебания пойдут по новым формам с новыми частотами.

### 3. Динамический процесс, вызванный внезапным образованием трещины в заделке

3.1 Собственные изгибные колебания балки с частично свободным концом  $\xi = 0$  и шарниром в конце  $\xi = 1$

Используя то же матричное уравнение (12), удовлетворяя граничным условиям

$$W'_0 = W'''_0 = 0; \quad W(1) = W''(1) = 0, \quad (17)$$

получаем частотное уравнение

$$B_4(1)B_6(1) - (rp)^2 B_2^2(1) = 0, \quad (18)$$

три первых собственные частоты

$$\Omega_1 = 26,46, \quad \Omega_2 = 36,98, \quad \Omega_3 = 70,92$$

и формы собственных колебаний и изгибающих моментов

$$V(\xi) = B_4(\xi) - \frac{B_4(1)}{B_2(1)} B_2(\xi) \quad (19)$$

$$M(\xi) = V''(\xi) = (rp)^2 B_2(\xi) - \frac{B_4(1)}{B_2(1)} B_6(\xi) \quad (20)$$

На рисунке 7 показаны первые три формы собственных колебаний и изгибающих моментов.

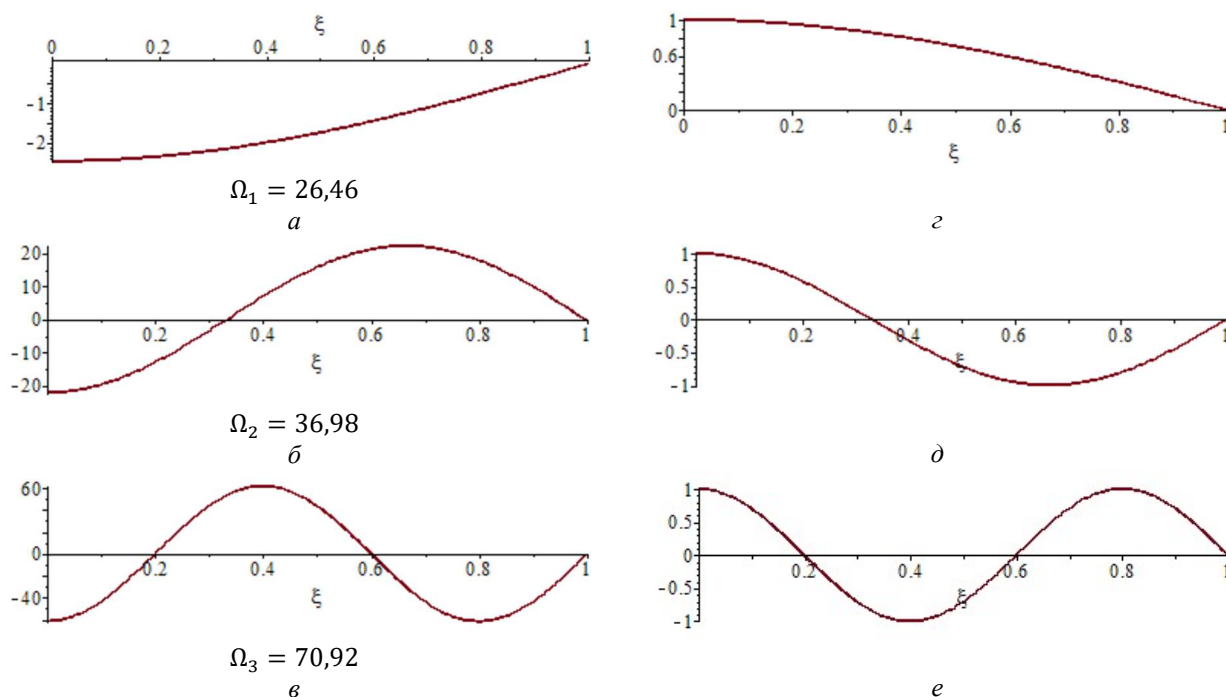


Рисунок 7 – Формы собственных колебаний: а – 1ая форма, б – 2ая форма, в – 3я форма) балки и изгибающие моменты, соответствующие формам колебаний (г – 1ая форма, д – 2ая форма, е – 3я форма) после второго повреждения

3.2 Вынужденные колебания балки после внезапного повреждения балки в сечении  $\xi = 0$  (заделка)

Прогиб  $V_{\text{дин}}(\xi, T)$  в новом динамическом процессе представим разложением в ряд по формам собственных колебаний  $V_n(\xi)$  дважды повреждённой балки (19)

$$V_{\text{дин}}(\xi, T) = \sum_{n=1}^3 (E_{1n} \cos \Omega_n T + E_{2n} \sin \Omega_n T) V_n(\xi) \quad (21)$$

Время длительности  $\tau$  нового динамического процесса отсчитывается от времени  $\tau^*$  – момента образования трещины, тогда

$$T = \tau^* + \tau.$$

До момента времени  $\tau^*$  прогибы определялись функцией  $W_{\text{дин}}(\xi, \tau)$  ( $\tau < \tau^*$ ).



Коэффициенты ряда (21) получаем, удовлетворяя начальным условиям нового процесса

$$V_{\text{дин}}(\xi, 0) = \sum_{n=1}^3 (E_{1n} \cos \Omega_n \tau^* + E_{2n} \sin \Omega_n \tau^*) V_n(\xi) = W_{\text{дин}}(\xi, \tau^*),$$

$$\dot{V}_{\text{дин}}(\xi, 0) = \sum_{n=1}^3 \Omega_n (-E_{1n} \sin \Omega_n \tau^* + E_{2n} \cos \Omega_n \tau^*) V_n(\xi) = \dot{W}_{\text{дин}}(\xi, \tau^*).$$

Умножая обе части уравнений на  $V_n(\xi)$  и интегрируя по  $\xi$  от 0 до 1, получаем систему уравнений для определения коэффициентов разложения (21)  $E_{1n}$  и  $E_{2n}$

$$E_{1n} \cos \Omega_n \tau^* + E_{2n} \sin \Omega_n \tau^* = \frac{\int_0^1 W_{\text{дин}}(\xi, \tau^*) V_n(\xi) d\xi}{\int_0^1 V_n^2(\xi) d\xi},$$

$$-E_{1n} \sin \Omega_n \tau^* + E_{2n} \cos \Omega_n \tau^* = \frac{\int_0^1 \dot{W}_{\text{дин}}(\xi, \tau^*) V_n(\xi) d\xi}{\int_0^1 V_n^2(\xi) d\xi}.$$

Ниже представлены формы вынужденных колебаний и изгибающих моментов (рисунок 8) и развертка движения концевой сечения  $\xi=0$  (рисунок 9) после трещинообразования.

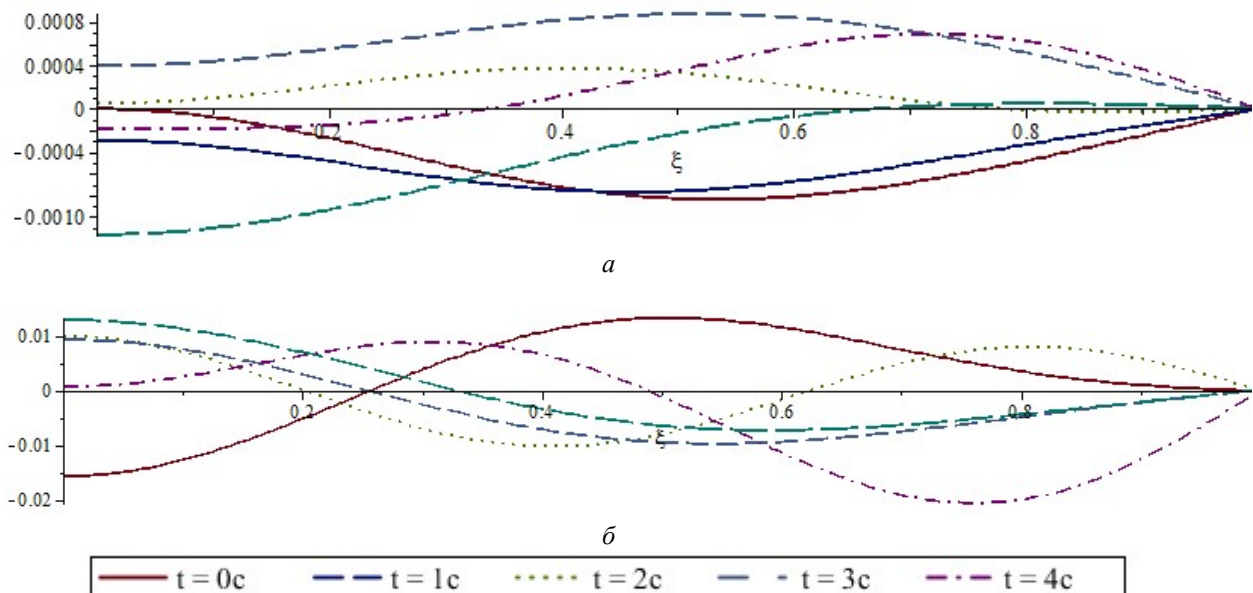


Рисунок 8 – Эпюры прогибов (а) и изгибающие моменты (б) в различные моменты времени после второго повреждения балки

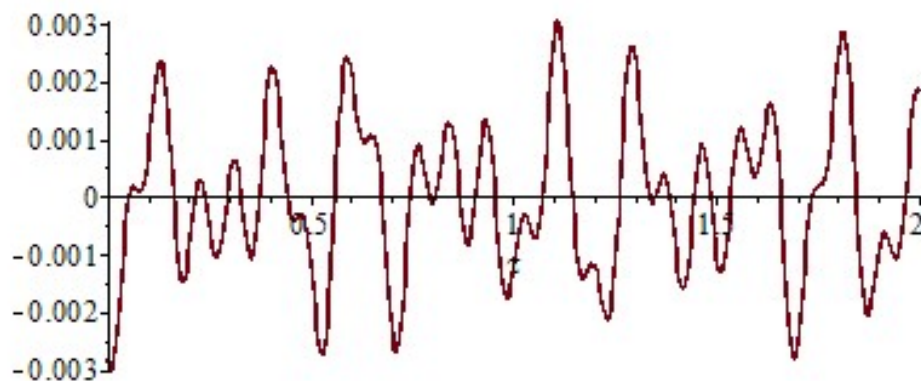


Рисунок 9 – Развёртка движений левого концевой сечения после двух повреждений



### **Заключение**

Построена математическая модель последовательности нескольких возможных состояний конструктивно-нелинейной системы «балка-основание Пастернака». Смена конструктивных и расчетных схем и состояний системы наступает в результате определённой последовательности локальных повреждений опорных устройств и трещинообразования. Для конкретных значений обобщённых жесткостных характеристик системы выполнены численные расчёты статических и динамических параметров процесса, позволяющие оценивать изменения деформаций и внутренних силовых факторов на всех стадиях рассматриваемого процесса. Результаты работы расширяют диапазон подходов к решению проблем конструкционной безопасности и живучести несущих конструкций и могут быть использованы в проектной практике.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Айдемиров, К.Р. Состояние проблемы прогрессирующего разрушения зданий и сооружений, классификация задач и подходы к их решению / К.Р. Айдемиров // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2010. – №3(18). – С.117-129.
2. Меркулов, С.И. Проектирование с учётом возможного прогрессирующего разрушения – обеспечение конструктивной безопасности в условиях аварийной ситуации / С.И. Меркулов, Н.В. Полякова // AUDITORIUM. Электронный научный журнал Курского государственного университета. – 2016. – № 4(12).
3. Поддубный, А.А. Динамический отклик системы «балка – двухпараметрическое основание» на внезапное трещинообразование / А.А. Поддубный, В.А. Гордон, Г.А. Семёнова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2024. – №1.
4. Fwa, T.F. Use of Pasternak foundation model in concrete pavement analysis / J.of Transportation engineering. – 1996. – Vol.122. – № 4. – P. 323-328.
5. Teodoru, I.B. Beam element on linear variable two-parameter elastic foundation / I.B. Teodoru, V. Musat // Buletinul Institutului Politehnic din Iasi. – 2008. – T. Liv. – P. 69-78.
6. Поддубный, А.А. Собственные поперечные колебания балки на упругом основании Пастернака / А.А. Поддубный, В.А. Гордон // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2023. – №3(359). – С.14-32.
7. Гордон, В.А. Реакция системы «балка-упругое основание» на внезапное изменение граничных условий / В.А. Гордон, В.И. Колчунов, В.А. Трифионов // Строительство и реконструкция. – 2018. – №1. – С.8-21.

#### **Поддубный Алексей Алексеевич**

Белорусский государственный университет  
транспорта, г. Гомель  
Кандидат физико-математических наук, доцент,  
начальник факультета  
246653, г. Гомель, ул. Кирова, 34  
E-mail: bsut@bsut.by

#### **Гордон Владимир Александрович**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл  
Доктор технических наук, профессор, профессор  
кафедры технической физики и математики  
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, д. 95  
Тел. +7 (4862) 41-98-48  
E-mail: gordon@ostu.ru

#### **Семёнова Галина Александровна**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл  
Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры  
технической физики и математики  
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, д. 95  
Тел. +7 (4862) 41-98-48  
E-mail: greece-g2011@yandex.ru

---

A.A. PODDUBNY, V.A. GORDON, G.A. SEMENOVA

### **DYNAMIC SYSTEM RESPONSE “BEAM – TWO-PARAMETER FOUNDATION” FOR SUDDEN CRACK FORMATION**

**Abstract.** *This paper presents a mathematical model of a three-stage static-dynamic process in a statically loaded system “beam – two-parameter Pasternak foundation”, initiated by successive sudden changes in boundary conditions. The initial working static state of a beam with rigidly clamped ends is transformed into bending vibrations due to a sudden break in the connection that prevents the section from rotating in one of the supports, which leads to*

*redistribution and growth of internal forces and deformations to values exceeding permissible values. For this reason, at some moment of forced vibrations, a through crack suddenly forms in the beam at another support. As a result, the design and design schemes of the “beam-foundation” system change again, and the frequencies and shapes of natural and forced vibrations change.*

**Keywords:** beam, Pasternak base, local damage, vibrations, progressive destruction.

## BIBLIOGRAPHY

1. Ajdemirov, K.R. Sostoyanie problemy` progressiruyushhego razrusheniya zdaniy i sooruzhenij, klassifikaciya zadach i podxody` k ix resheniyu / K.R. Ajdemirov // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta. Texnicheskie nauki. – 2010. – №3(18). – S.117-129.
2. Merkulov, S.I. Proektirovanie s uchyotom vozmozhnogo progressiruyushhego razrusheniya – obespechenie konstruktivnoj bezopasnosti v usloviyax avarijnoj situacii / C.I. Merkulov, N.V. Polyakova // AUDITORIUM. E`lektronny`j nauchny`j zhurnal Kurskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2016. – № 4(12).
3. Poddubny`j, A.A. Dinamicheskij otklik sistemy` «balka – dvuxparametricheskoe osnovanie» na vnezapnoe treshhinoobrazovanie / A.A. Poddubny`j, V.A. Gordon, G.A. Semyonova // Fundamental`ny`e i prikladny`e problemy` texniki i texnologii. – 2024. – №1. – S.
4. Fwa, T.F. Use of Pasternak foundation model in concrete pavement analysis / J.of Transportation engineering. – 1996. – Vol.122. – № 4. – P. 323-328.
5. Teodoru, I.B. Beam element on linear variable two-parameter elastic foundation / I.B. Teodoru, V. Musat // Buletinul Institutului Politehnic din Iasi. – 2008. – T. Liv. – P. 69-78.
6. Poddubny`j, A.A. Sobstvenny`e poperechny`e kolebaniya balki na uprugom osnovanii Pasternaka / A.A. Poddubny`j, V.A. Gordon // Fundamental`ny`e i prikladny`e problemy` texniki i texnologii, 2023. – №3(359). – S.14-32.
7. Gordon, V.A. Reakciya sistemy` «balka-uprugoe osnovanie» na vnezapnoe izmenenie granichny`x uslovij / V.A. Gordon, V.I. Kolchunov, V.A. Trifonov // Stroitel`stvo i rekonstrukciya. – 2018. – №1. – S.8-21.

### **Poddubny Alexey Alekseevich**

Belarusian State University transport, Gomel  
Ph.D., Associate Professor of the Department of Physical  
and Mathematical Sciences, head of faculty  
246653, Gomel, st. Kirova, 34  
E-mail: bsut@bsut.by

### **Gordon Vladimir Aleksandrovich**

Orel State University  
Doctor of technical Sciences, Professor of the  
Department of technical physics and mathematics  
302026, Orel, Komsomolskaya str., 95  
Phone: +7 (4862) 41-98-48  
E-mail: gordon@ostu.ru

### **Semenova Galina Aleksandrovna**

Orel State University  
Ph.D., Associate Professor of the Department of  
technical physics and mathematics  
302026, Orel, Komsomolskaya str., 95  
Phone: +7 (4862) 41-98-48  
E-mail: greece-g2011@yandex.ru

© А.А. Поддубный, В.А. Гордон, Г.А. Семенова, 2024

# **МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ** **И ОБОРУДОВАНИЕ**

УДК 658.512.011.56

DOI: 10.33979/2073-7408-2024-364-2-12-17

А.В. НЕМЕНКО, М.М. НИКИТИН

## **ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН НА ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

**Аннотация.** При механической обработке деталей машин в зоне контакта «инструмент-заготовка» возникают напряжения, которые деформируют материал заготовки и, в силу повторяемости производственных движений, носят циклический характер, что вызывает усталостные повреждения и сокращает долговечность изделия. Уменьшение числа циклов нагружения при изготовлении объекта с сохранением его выходных показателей качества способствует повышению долговечности. Применение прогностических моделей с вероятностной связью между измеримой координатой инструмента и скрытой координатой недеформированной заготовки после снятия тепловых и механических напряжений позволяет оптимизировать управление технологическим процессом. При этом в качестве контрольного параметра применяется сумма абсолютных ошибок прогноза позиционирования инструмента на предварительно обученной модели. Циклическая ошибка в этом случае представлена в виде процесса авторегрессии ненулевого порядка с построением соответствующей скрытой модели. Полученные результаты применимы в задачах машинного обучения станков с числовым программным управлением.

**Ключевые слова:** циклическое нагружение, технологическая усталость, контроль по косвенным параметрам, скрытая марковская модель, марковская последовательность, программная обработка.

### **Введение.**

При изготовлении большинство деталей подвергаются циклическим нагрузкам от воздействия режущего и шлифующего инструмента. Это создает предпосылки к сокращению эксплуатационного ресурса.

Стохастический характер распределения дефектов во внутренней структуре материала, а также технологических, эксплуатационных нагрузок приводит к вероятностному характеру эксплуатационного ресурса получаемого изделия.

Возникает задача стабилизации параметров технологического процесса для улучшения ресурса создаваемого изделия.

Известным принципом максимизации эксплуатационного ресурса после завершения обработки является минимизация роста структурных дефектов в её процессе.

При этом требуется сформировать минимально необходимое инструментальное воздействие для снятия заданного объёма материала при фиксированных характеристиках технологического усилия.

Методы изготовления деталей включают получение заготовки и её черновую и чистовую обработку.

Существующие методы механической обработки деталей конечной жесткости, таких как лопасти судовых и авиационных винтов, вызывают циклические колебания объекта изготовления и инструмента, его обрабатывающего. Вместе с тем, известно, что точные аналитические решения уравнения возникающих колебаний в системе «станок-приспособление-инструмент-деталь» могут быть получены в немногих случаях, при отступлении от которых возрастает ошибка математической модели.

Применение методов численного интегрирования вводит трудно прогнозируемую ошибку начальных данных, для адекватной оценки которой необходим натурный эксперимент.

В работах [1]...[3] была рассмотрена аналогичная задача с моделью цепи Маркова первого порядка. По ряду причин, такая модель оказывается применимой к достаточно узкому классу технологических процессов, которым соответствует модель авторегрессии первого порядка. Более общим классом процессов являются процессы авторегрессии порядка  $k$ , одной

из форм описания которых являются кратные цепи Маркова с дискретным временем и непрерывным пространством состояний.

Задача построения скрытой модели для таких процессов отвечает рассматриваемой проблематике и будет рассмотрена в настоящей работе.

### Основная часть.

Заготовка и готовое изделие характеризуются текущими уровнями нормальных и касательных напряжений, связь которых с ресурсом дается функцией выносливости.

Считаем, что производится непрерывная обработка программно управляемым инструментом. В дискретные моменты времени измеряется координата инструмента относительно фиксированной базы. Ей соответствует координата изделия в напряженном и деформированном состоянии. Конечной задачей обработки является получение изделия с заданной геометрией в недеформированном состоянии, промежуточными подзадачами – правильное вычисление недеформированной координаты обрабатываемой точки.

Мерой качества обработки за фиксированное количество операций будем считать суммарное среднее квадратическое отклонение прогнозного и фактического значений координаты недеформированной поверхности, которое мы обозначим через  $S^2$ .

Время до отказа детали в эксплуатации будем рассматривать как случайную величину, заданную семейством условных функций распределения при разных уровнях  $S^2$

$$V(x | S) = P\{t < x | S^2\}, \quad (1)$$

где правая часть определяет вероятность того, что измеренное значение времени окажется меньше предустановленного значения  $x$ , в предположении, что уровни циклических напряжений и циклической частоты будут постоянными и равными заданным значениям.

Считаем также, что существует условная плотность вероятности времени до отказа, равная производной функции распределения (1) по предустановленному значению  $x$ :

$$v(x | S^2) = \frac{d}{dx} \cdot V(x | S^2). \quad (2)$$

Обозначим события:  $A$  – деталь не разрушилась при изготовлении за время  $t_H$ ,  $B$  – деталь не разрушилась при эксплуатации за время  $t_3 = x$ .

Будем искать условную вероятность  $P(B|A)$  события  $B$  в предположении, что событие  $A$  уже произошло. По определению условной вероятности, получим:

$$P(B | A) = \frac{P(B \cdot A)}{P(A)}, \quad (3)$$

где в числителе стоит вероятность совместного наступления введенных событий  $A$  и  $B$ . Оба события рассмотрим в предположении одной и той же суммарной средней квадратической ошибки позиционирования инструмента.

Знаменатель формулы (3) можно получить по формуле

$$P\{t < t_u + x | S^2, t >\} = \frac{V(t_H + x | S^2) - V(t_H | S^2)}{1 - V(t_H | S^2)}, \quad (4)$$

Тогда математическое ожидание времени до отказа лопасти в эксплуатационных условиях  $t_3 = x$  может быть найдено как

$$M(t_3) = \frac{1}{(1 - V(t_H | S^2))} \int_0^\infty x \cdot dP\{t < x | S^2, t > t_u\}. \quad (5)$$

Учитывая существование плотности (2), представим формулу (5) в виде

$$M(t_3) = \frac{1}{(1 - V(t_H | S^2))} \int_0^\infty x \cdot v(t_H + x | S^2) dx. \quad (6)$$

В формуле (6) варьирование среднего времени безотказной работы достигается выбором плотности вероятности, соответствующей данному значению  $S^2$ , из семейства всех возможных плотностей вероятности, что может быть достигнуто различными способами.



$$\sum_{i=p}^{p+k} \xi_k(i) = \xi_{k-1}(p+k) - \xi_{k-1}(p), \quad (17)$$

которая доказывается по индукции.

Введем плотность вероятности суммы (17)

$$g(x) = \frac{d}{dx} \cdot P \left\{ \sum_{i=p}^{p+k} \xi_k(i) < x \right\}. \quad (18)$$

Учитывая формулу (16), левую часть формулы (17), и известную формулу для плотности суммы одинаково распределенных случайных величин, получим следующее соотношение

$$g(x) = f^{*(n)}(x), \quad (19)$$

где в правой части находится  $n$ -кратная свёртка плотности (16).

Считаем, что появление последнего из значений скрытого размера приводит к появлению явного параметра  $Y_n$  на отсчетном устройстве с вероятностью, задаваемой функцией связи

$$R(y|x) = P\{Y_n \leq y | X_n = x\}, \quad (20)$$

где  $P\{Y_n \leq y\}$  – вероятность события, состоящего в том, что появившееся на шаге  $n$  значение явного размера окажется меньше предустановленного значения  $y$ . Таким образом, задаваясь значением  $y$ , мы с помощью функции связи получаем вероятность рассмотренного события. Отметим, что функция связи является условной функцией распределения.

В общем случае задача получения прогнозной последовательности на основании формул (12 – 20) отличается большой вычислительной затратностью, но при допущении о нормальности всех плотностей вероятности, входящих в формулы, вычислительная часть может быть существенно упрощена путем использования соотношений, полученных в работе [3]. В частности, процесс получения прогнозной последовательности (10) может быть описан парой функций, рекуррентно переходящих друг в друга

$$k_n(x, y_1, y_2, \dots, y_{n-1}) = \int_{-\infty}^{\infty} u_{n-1}(z|y_1, y_2, \dots, y_{n-1}) \cdot g(x-z) dz, \quad (21)$$

$$u_n(x|y_1, y_2, \dots, y_n) = \frac{r(y_n|x) \cdot k_n(x|y_1, y_2, \dots, y_{n-1})}{\int_{-\infty}^{\infty} r(y_n|x) \cdot k_n(x, y_1, y_2, \dots, y_{n-1}) dx}, \quad (22)$$

причем

$$k_n(x, y_1, y_2, \dots, y_{n-1}) = \frac{dP\{\tilde{X}_n = x | Y_1 = y_1, Y_2 = y_2, \dots, Y_{n-1} = y_{n-1}\}}{dx}, \quad (23)$$

$$u_n(x|y_1, y_2, \dots, y_n) = \frac{dP\{\tilde{X}_n = x | Y_1 = y_1, Y_2 = y_2, \dots, Y_{n-1} = y_{n-1}, Y_n = y_n\}}{dx}. \quad (24)$$

Критерием, непосредственно входящим в формулу (10), будет являться математическое ожидание прогнозного значения (24) на каждом шаге

$$\tilde{X}_n = \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot u_n(x|y_1, y_2, \dots, y_n) dx. \quad (25)$$

Как было показано в работе [3], ядром модели являются плотности

$$\pi(x) = \frac{1}{\sigma_\pi \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a_\pi)^2}{2\sigma_\pi^2}}, \quad (26)$$

$$g(x) = \frac{1}{\sigma_g \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a_g)^2}{2\sigma_g^2}}, \quad (27)$$

$$r(Y_n|x) = \frac{1}{\sigma_r \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-Y_n-a_r)^2}{2\sigma_r^2}}. \quad (28)$$



В выражения (26) – (28) входят средние квадратические отклонения  $\sigma_\pi$ ,  $\sigma_g$ ,  $\sigma_r$  и математические ожидания  $a_\pi$ ,  $a_g$ ,  $a_r$  плотности начального распределения (26), а также плотности (18) в нормальной форме (27) и функции связи (28)

Тогда непосредственные расчетные формулы для элементов последовательности (10) примут вид

$$\tilde{X}_n = \frac{a_{k_n} \cdot \sigma_r + (Y_n + a_r) \cdot \sigma_{k_n}}{\sigma_r^2 + \sigma_{k_n}^2}, \quad (29)$$

$$\sigma_{k_n} = \sqrt{\sigma_g^2 + \sigma_{u_{n-1}}^2}, \quad (30)$$

$$\sigma_{u_n} = \frac{\sigma_r \cdot \sigma_{k_n}}{\sigma_r^2 + \sigma_{k_n}^2}, \quad (31)$$

$$a_{k_n} = a_g + \tilde{X}_{n-1}. \quad (32)$$

По вычисленным последовательностям (10) подбираются параметры функций (26) – (28), минимизирующие величину критерия (7).

Экспериментальные исследования показали, что возможно провести корректирование движения инструмента с целью уменьшения суммарных перемещений для выполнения установленных технологических действий.

Установлено, что предлагаемая прогнозная модель обладает свойством устойчивости – прогнозный график в целом коррелирует с действительным (скрытым) графиком, прямого доступа к которому модель не имеет, но имеет вероятностную связь через измеряемую координату инструмента.

**Выводы.** Механическая обработка деталей машину уменьшает их расчетный эксплуатационный ресурс вследствие воздействия технологических нагрузок в циклическом режиме, что вызывает усталостные повреждения и уменьшает долговечность изделия. Стохастический характер процесса усталостного разрушения при сочетании индетерминированного распределения микродефектов с индетерминированным нагружением объекта в процессе эксплуатации приводит к ненулевой вероятности отказа в течение любого заданного интервала.

Стабилизация технологического процесса имеет цель убрать аномалии этого процесса.

Задача рассмотрена в предположении вероятностной связи между положением инструмента и координатой недеформированной поверхности обрабатываемой заготовки, и переформулирована как нахождение минимальной меры ошибки позиционирования инструмента в течение всего процесса его использования.

В качестве меры суммарной ошибки обработки предложена сумма квадратов ошибок прогноза позиционирования инструмента за дискретные интервалы времени, полученная на предварительно обученной модели.

Для этого использовалось представление ошибки позиционирования в виде процесса авторегрессии ненулевого порядка с построением соответствующей скрытой модели.

Процесс изменения координаты контрольной точки заготовки при обработке представлен в виде марковской модели с дискретным временем и непрерывным пространством состояний, в качестве которых рассматривается область позиционирования режущего инструмента.

Задача идентификации модели может быть представлена в виде последовательных подзадач: проверка гипотезы о нормальном распределении разностей, их независимости и подборе параметров распределения и функции связи.

Рассматриваемый подход предоставляет ресурс повышения качества изделий, предназначенных для работы в условиях циклических нагрузок при изготовлении их на станках с числовым программным управлением.

Перспективной областью применения полученных результатов является также 3D-печать корпусных конструкций.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неменко А.В. Оценка изменения структуры материала изделия при его механической обработке // А.В. Неменко, М.М. Никитин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2021, №4(348), С. 164-169.

2. Неменко А.В. Непрямые оценки качества поверхностей второго порядка при финишной обработке/А.В. Неменко, М.М. Никитин//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2023, №4 (360). С.89-95.

3. Неменко А.В. Оптимизация прогнозно-технологической оценки качества финишной обработки поверхностей второго порядка/А.В. Неменко, М.М. Никитин//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2023, №5 (361). С.197-87.

4. Kobayashi H., Mark B., Turin W. Probability, Random Processes and Statistical Analysis. Cambridge University Press, 2012 – 813 p.

5. Cappe' O., Moulines E., Ryde'n T. Inference in Hidden Markov Models/ Springer, 2005 – 652 p.

6. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий/Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. М.:Наука, 1976. – 278 с.

**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

A.V. NEMENKO, M.M. NIKITIN

## INFLUENCE OF MACHINE PARTS MECHANICAL PROCESSING ON THEIR OPERATIONAL CHARACTERISTICS

**Abstract.** When machining machine parts, stresses arise in the “tool-workpiece” contact zone, which deform the workpiece material and, due to the repetition of production movements, are cyclic in nature, which causes fatigue damage and reduces the durability of the product. Reducing the number of loading cycles during the manufacture of an object while maintaining its output quality indicators helps to increase durability. The use of predictive models with a probabilistic relationship between the measurable coordinate of the tool and the hidden coordinate of the undeformed workpiece after removing thermal and mechanical stresses allows optimizing process control. In this case, the sum of absolute errors in predicting tool positioning on a pre-trained model is used as a control parameter. The cyclic error in this case is represented as a non-zero order autoregressive process with the construction of a corresponding hidden model. The results obtained are applicable in machine learning problems of numerically controlled machine tool.

**Keywords:** cyclic loading, technological fatigue, control by indirect parameters, hidden Markov model, Markov sequence, software processing.

## BIBLIOGRAPHY

1. Nemenko A.V. Otsenka izmeneniya struktury materiala izdeliya pri yego mekhanicheskoy obrabotke /A.V. Nemenko, M.M. Nikitin//Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii, 2021, №4(348), S. 164-169.

2. Nemenko A.V. Nepryamyye otsenki kachestva poverkhnostey vtorogo poryadka pri finishnoy obrabotke/A.V. Nemenko, M.M. Nikitin//Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii, 2023, №4 (360). S.89-95.

3. Nemenko A.V. Optimizatsiya prognoznno-tekhnologicheskoy otsenki kachestva finishnoy obrabotki poverkhnostey vtorogo poryadka/A.V. Nemenko, M.M. Nikitin//Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii, 2023, №5 (361). S.197-87.

4. Kobayashi H., Mark B., Turin W. Probability, Random Processes and Statistical Analysis. Cambridge University Press, 2012 – 813 p.

5. Cappe' O., Moulines E., Ryde'n T. Inference in Hidden Markov Models/ Springer, 2005 – 652 p.

6. Adler YU.P. Planirovaniye eksperimenta pri poiske optimal'nykh usloviy/YU.P. Adler, Ye.V. Markova, YU.V. Granovskiy. M.: Nauka, 1976. – 278 s.

**Nemenko Alexandra Vasilyevna**

FSAEI HE Sevastopol State University, Sevastopol  
Ph.D. in Tech Science, assistant professor of chair «Digital Design»  
Universitetskaya st, 33, Sevastopol, Russian Federation, 299053  
Phone. +79788330519  
E-mail: valesan@list.ru

**Nikitin Mikhail Mikhailovich**

FSAEI HE Sevastopol State University, Sevastopol  
Senior lecturer of chair «Higher Mathematics »  
Universitetskaya st, 33, Sevastopol, Russian Federation, 299053  
Phone +79788150316  
E-mail: m.nikitin.1979@gmail.com

С.М. БРАТАН, Н.И. ПОКИНТЕЛИЦА, Ч.Ф. ЯКУБОВ, А.С. ЧАСОВИТИНА

## МЕТОДИКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ОЦЕНКИ ГЕОМЕТРИИ ИНСТРУМЕНТА С УЧЕТОМ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

**Аннотация.** В статье представлено описание формы инструмента с помощью функциональных рядов. Математическое описание микро- и макрогеометрии инструмента и деталей, а также описание теплофизических параметров осуществлено с использованием функциональных рядов на базе специальных функций. Для цилиндрических поверхностей используются ряды Фурье и ряды, составленные из гиперболических функций, а для торцевых поверхностей инструмента – ряды Фурье-Бесселя. В качестве теплофизических параметров для описания взята температура по плоскости диска и температура жидкого металла, а также радиальная и тангенциальная проекции теплового потока, имеющего место в объеме режущего диска. Разработаны методы оценки геометрии инструмента разного вида.

**Ключевые слова:** геометрические параметры, теплофизические параметры, инструмент

### Введение

Оценка геометрических параметров инструмента в цилиндрической системе координат обычно производится с помощью допусков на линейные и диаметральные размеры, а также допусков формы и взаимного расположения поверхностей. При этом вводятся некоторые интегральные показатели отклонений размеров, формы и расположения поверхностей. Для повышения качества оценки точности целесообразно использовать более совершенные детальные методы оценки точности. Введение детализации в методику оценки требует применения соответствующего математического аппарата и значительного объема вычислений, но для имеющихся средств вычислительной техники эти факторы не существенны.

### Основная часть

Математическое описание микро- и макрогеометрии инструмента и деталей, а также описание теплофизических параметров осуществляется с использованием функциональных рядов на базе специальных функций [1]. Разработанные методы математического описания параметров обработки используют разные функциональные ряды. Для цилиндрических поверхностей используются ряды Фурье и ряды, составленные из гиперболических функций, а для торцевых поверхностей инструмента – ряды Фурье-Бесселя. В качестве теплофизических параметров для описания взята температура по плоскости диска и температура жидкого металла, а также радиальная и тангенциальная проекции теплового потока, имеющего место в объеме режущего диска.

Рассмотрим типичный режущий диск, имеющий цилиндрические и торцевые поверхности (рисунок 1).

Стоит отметить, что наиболее эффективно описываемые методы применяются для плоских деталей и деталей типа тел вращения сложной формы. Ось инструмента  $z$  принимается за базу отсчета координат реальной поверхности. Все поверхности инструмента разделены на две разнородные группы в зависимости от их расположения относительно оси. К первой группе отнесены поверхности, образующие линии которых параллельны оси или наклонены к оси под некоторым углом  $\alpha \ll 90^\circ$ .

На рисунке 1 к первой группе относятся цилиндрические поверхности 1, 2 и криволинейная поверхность кромки круга 3. Ко второй группе относятся поверхности, перпендикулярные оси, а также поверхности, образующие линии которых наклонены к оси под углом  $\beta \approx 90^\circ$  (это торцевые поверхности 4 и коническая поверхность 5).

Номинальная форма инструмента определяется контуром  $L$ , вращение которого вокруг оси  $z$  образует пространственную форму инструмента. Контур  $L$  может быть задан аналитически в виде разных зависимостей для разных групп поверхностей.

Для поверхностей первой группы (цилиндрических) контур задан в виде зависимости от осевой координаты  $z$  по участкам  $i$

$$L_i = L_i(z), \rho_i = \text{const} . \quad (1)$$

Для поверхностей второй группы (торцевых) контур задан в виде зависимости от радиальной координаты  $\rho$  по участкам  $j$ , а именно:

$$L_j = L_j(\rho), z_j = \text{const} . \quad (2)$$

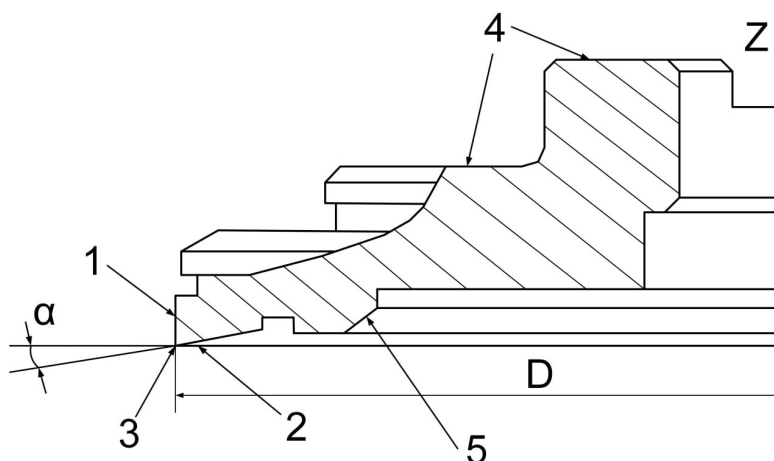


Рисунок 1 – Базовый инструмент с острой кромкой и углом режущей части менее 90°

Предложенные методы описания параметров применены для определения:

- точности изготовления инструмента и погрешностей его установки в шпиндельном узле станка;
- фактического положения инструмента относительно детали в фиксированный момент времени;
- характера распределения температуры в материале инструмента и заготовки;
- радиальных и тангенциальных проекций теплового потока в плоском сечении инструмента.

Оценка параметров осуществляется вводом функции отклонений  $U$ , что зависит от трех пространственных координат: осевого расстояния  $z$ , радиуса  $\rho$  и полярного угла  $\varphi$ . Функция отклонений определяет отклонение параметра его номинального значения в отдельной точке пространства в выбранной системе координат [2]. Для цилиндрической системы координат она зависит только от координат  $z$ ,  $\varphi$  и не зависит от радиуса  $\rho$ , то есть функция отклонений:

$$U_i = U_i(z, \varphi) . \quad (3)$$

Для полярной системы координат функция отклонений зависит только от координат  $\rho$ ,  $\varphi$ . В этом случае:

$$U_j = U_j(\rho, \varphi) . \quad (4)$$

Функцию отклонений предложено представить в виде произведения функциональных рядов, составленных из универсальных базисных функций одной переменной:

$$Z_k(z), \Phi_m(\varphi), R_n(\rho) .$$

Аналогично описывается положение инструмента относительно детали в фиксированный момент времени. При этом выбирается подвижная система цилиндрических координат, имеющая ось  $z$  на оси вращения инструмента. Функция отклонений определяет статическое или динамическое изменение относительного положения инструмента и детали. Для описания геометрических параметров выбираются полярная или цилиндрическая система координат. Теплофизические параметры определяются функциями отклонений температуры относительно температуры окружающей среды. Для проекций теплового потока функция отклонений определяет собственно тепловой поток [3-5]. Для теплофизических параметров использованы цилиндрическая и полярная системы координат. Вводимые функции зависят от соответствующих пространственных координат. Число базисных функций выбирается в зависимости от требуемой точности математического описания параметров. Таким образом, функция отклонений для цилиндрической системы координат определена в виде произведения:

$$U_i(z, \varphi) = Z(z) \cdot \Phi(\varphi) = \sum_{m=0}^M \Phi_m(\varphi) \cdot \sum_{k=0}^K Z_k(z) , \quad (5)$$

где  $M$  – число составляющих функционального ряда, составленного из базисных функций  $\Phi_m(\varphi)$ , зависящих от полярного угла  $\varphi$ ;

$K$  – число членов ряда, состоящего из базисных функций  $Z_k(z)$ .

Для полярной системы координат функция отклонений имеет вид:

$$U_j(\rho, \varphi) = R(\rho) \cdot \Phi(\varphi) = \sum_{m=0}^M \Phi_m(\varphi) \cdot \sum_{n=0}^N R_n(\rho), \quad (6)$$

где  $N$  – число членов ряда, состоящего из базисных функций  $R_n(\rho)$ .

Такая форма математического описания реализует разделение переменных по пространственным координатам  $\rho, \varphi, z$ .

Базисные функции под знаком сумм (5) и (6) включают в себя произвольные константы, поэтому они могут быть умножены на величины, не зависящие от их аргументов. Соответственно обе формулы (5), (6) можно объединить и записать в общем виде:

$$U(\rho, \varphi, z) = \Phi(\varphi) \cdot Z(z) \cdot R(\rho) = \sum_{m=0}^M \Phi_m(\varphi) \cdot \sum_{k=0}^K Z_k(z) \cdot \sum_{n=0}^N R_n(\rho). \quad (7)$$

Функция отклонений определена для полярного угла  $\varphi = 0 \dots 2\pi$ . Значения функции для углов  $\varphi = 0$  и  $\varphi = 2\pi$  совпадают, поэтому функция отклонений  $U$  является периодической с периодом  $2\pi$  по переменной  $\varphi$ . Соответственно, базисные функции  $\Phi_m(\varphi)$  являются периодическими с периодом  $2\pi$ . Для описания таких зависимостей наиболее целесообразно взять составляющие ряда Фурье и базисную функцию определить, как

$$\Phi_m(\varphi) = C_{1m} \cdot \cos(m\varphi) + C_{2m} \cdot \sin(m\varphi), \quad (8)$$

где  $C_{1m}$  и  $C_{2m}$  – постоянные коэффициенты базисной функции (в общем виде могут зависеть от координат  $z$  и  $\rho$ ).

Коэффициенты ряда Фурье связаны со значением функции в зависимостях:

$$C_{1m} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \Phi(\varphi) \cdot \cos(m\varphi) d\varphi; \quad C_{2m} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \Phi(\varphi) \cdot \sin(m\varphi) d\varphi, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (9)$$

Определение коэффициентов ряда  $C_{1m}$  и  $C_{2m}$  для реальных параметров инструмента проведено по специальной методике, которая учитывает некорректность постановки задачи нахождения коэффициентов ряда функции Фурье, определенной неточно, и осуществляет регуляризацию некорректно поставленной задачи нахождения коэффициентов. Базисные функции  $Z_k(z)$  в общем виде не являются периодическими. Они определяют зависимость функции отклонений от осевой координаты в сечении инструмента или детали продольной плоскостью, проходящей через ось инструмента. Возможны два качественно отличных случая. Первый соответствует приближительному равенству функции описания контура отклонений в начале и конце участка. При этом:

$$\Delta Z_k = Z_k(l) - Z_k(0); \quad Z_k(l) \approx Z_k(0), \quad (10)$$

где  $l$  – длина участка.

Учитывая приближительное равенство значений функции в начале и конце участка ее можно считать периодической с периодом  $l$ . Для математического описания данной зависимости использован тригонометрический ряд, базисные функции которого имеют вид:

$$Z_{k1}(z) = C_{1k} \cdot \cos\left(2\pi k \frac{z}{l}\right) + C_{2k} \cdot \sin\left(2\pi k \frac{z}{l}\right), \quad (11)$$

где  $C_{1k}$  и  $C_{2k}$  – постоянные коэффициенты, в общем виде зависящие от  $\varphi$ .

Второй случай соответствует непериодической функции с особенностями в пределах интервала [6]. Для описания такой функции использована зависимость (11), в которой период функции принят равным  $2l$ , а базовая функция включает только косинусную составляющую. В некоторых случаях такое описание параметра невозможно в силу особенностей процесса параметра в пределах участка. Например, это имеет место в случае, когда производная контура на границе участка приобретает достаточно большие значения. Для описания параметра при наличии таких случаев целесообразно использовать ряд, составляющие которого являются суммой гиперболических функций. Базисные функции при этом выглядят:

$$Z_{k2}(z) = C_{3k} \cdot ch(kqz) + C_{4k} \cdot sh(kqz),$$

где  $q$  – параметр, зависящий от формы образующей линии данного участка.

Для поверхностей инструмента, отнесенных ко второй группе (торцевых) математическую составляющую  $R(\rho)$  функции отклонений для данных поверхностей предложено описывать рядом Фурье-Бесселя [56, 216]. Базисные функции при этом определяются зависимостью:

$$R_n(\rho) = a_n \cdot J_0(\rho_n \cdot \rho), \quad (12)$$

где  $a_n$  – постоянные коэффициенты ряда (в общем случае коэффициенты зависят от полярного угла  $\varphi$ );

$\rho_n$  – последовательные корни функции Бесселя первого рода нулевого порядка:  $J_0(x) = 0$ .

Коэффициенты ряда Фурье-Бесселя для относительных значений радиуса в интервале  $\rho = [0; 1]$  связаны со значением функции следующими зависимостями:

$$a_n = \frac{2}{[J_1(\rho_n)]^2} \int_0^1 \rho \cdot R(\rho) \cdot J_0(\rho_n \rho) d\rho, \quad (13)$$

где  $J_1$  – функция Бесселя первого рода первого порядка.

В общем виде функция отклонений параметров определяется зависимостью (7). Подставив в нее значения базисных функций (8), (11), (12), получим формулу, описывающую распределение параметра по всем участкам контура

$$U(\rho, \phi, z) = \left[ \sum_{m=0}^M C_{1m} \cdot \cos(k\phi) + C_{2m} \cdot \sin(k\phi) \right] \cdot \left[ \sum_{k=0}^K C_{1k} \cdot \cos\left(2\pi k \frac{z}{l}\right) + C_{2k} \cdot \sin\left(2\pi k \frac{z}{l}\right) + C_{3k} \cdot ch(kqz) + C_{4k} \cdot sh(kqz) \right] \cdot \left[ \sum_{n=0}^N a_n \cdot J_0(\rho_n \cdot \rho) \right]. \quad (14)$$

В формуле (14) первая сумма в правой части описывает изменение параметра в зависимости от полярного угла  $\varphi$ . Изменение функции отклонений в зависимости от полярного угла  $\varphi$  определяет форму цилиндрических поверхностей инструмента, в частности эксцентричность, овальность, огранку. Соответственно данная зависимость описывает изменение толщины слоя металла между инструментом и деталью. В зависимости от номера базисной функции она описывает соответствующую особенность реального контура инструмента. Базисная функция с номером  $m = 0$  соответствует кругу с центром на оси инструмента. Функция с номером  $m = 1$  при значениях констант  $C_{1m}$ ,  $C_{2m}$ , гораздо меньших диаметра инструмента, соответствует окружности, центр которой смещен относительно оси инструмента. Базисная функция при  $m = 2$  описывает овальность сечения, а базисные функции при  $m = 3, 4, 5, 6, \dots$  описывают огранку поверхности инструмента соответственно по 3, 4, 5 и более граням.

В общем, сумма базисных функций позволяет описать произвольный контур инструмента. Посредством базисных функций гиперболического вида описываются продольные сечения инструмента специального вида. Торцевые поверхности инструмента описываются базисными функциями, вид которых соответствует формуле (12). Предлагаемая методика допускает обобщение математического описания на случай учета микрогеометрии поверхности инструмента и детали. При этом функциональные ряды продолжают в высокочастотную область, где они трансформируются в каноническое расписание случайного процесса, описывающего закономерности микрогеометрии поверхности инструмента или детали. В качестве примера рассмотрим функциональный ряд, описывающий функцию отклонений в тангенциальном направлении при наличии случайного процесса, соответствующего микрогеометрии поверхности инструмента. В общем виде функциональный ряд записывается в форме:

$$\Phi(\varphi) = \sum_{m=0}^M \Phi_m(\varphi) + \sum_{m=M_1}^{M_2} \Phi_m^*(\varphi), \quad (15)$$

где первая сумма в правой части соответствует детерминированному отклонению контура, а вторая сумма представляет собой каноническое разложение высокочастотного случайного процесса, соответствующего микрогеометрии поверхности инструмента. Координатные функции канонического разложения (15) выбраны в виде синусной и косинусной функций, поэтому базисная функция для описания случайного микрорельефа поверхности имеет вид:

$$\Phi_m^*(\varphi) = u_m^* \cos(m\varphi) + v_m^* \sin(m\varphi),$$

где  $u_m^*$ ,  $v_m^*$  – случайные величины с определенным законом распределения вероятности.

Данные случайные величины при расчетах контура инструмента определяются по результатам измерений или задаются генераторами случайных чисел с равномерными или нормальными законами распределения. Каноническое разложение применяется для высокочастотных процессов ( $M_1 \gg M$  в формуле (15)). Обычно число составляющих



канонического разложения принимается достаточным для описания всего спектра случайных отклонений ( $M_2 - M_1 \gg M$ ).

### **Заключение**

Предлагаемое математическое описание функции отклонений реальной формы инструмента от ее номинальных значений позволяет определить детерминированные и случайные погрешности формы инструмента. Этот метод целесообразно использовать для анализа микро- и макрогеометрии инструмента, в частности, для определения показателей выпуклости, вогнутости, бочкообразности, конусности, неплоскостности, а также взаимного расположения поверхностей (биения, перпендикулярности и т.п.) [7-11]. Применение предлагаемого способа позволяет повысить качество оценки точности инструмента. Математическое описание микро- и макрогеометрии инструмента обобщается на описание любого параметра, определенного на поверхности или в объеме инструмента. Такими параметрами могут быть твердость, остаточные напряжения, параметры шероховатости поверхности, например, среднеарифметическая величина микронеровностей ( $R_a$ ) и другие.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Pokintelitsa N. Thermophysical processes in thermofriction working of surfaces / N. Pokintelitsa, E. Levchenko // Materials Today: Proceedings IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 709 022008 IOP Publishing. – 2020.
2. Балакин В. А. Трение и износ при высоких скоростях скольжения / В. А. Балакин. - М.: Машиностроение, 1980.- 136 с
3. Насад Т. Г. Износ лезвийного инструмента при высокоскоростной обработке с дополнительным тепловым воздействием / Т. Г. Насад // Вестник Саратовского государственного технического университета. - 2005. - № 1(6). - С. 80-84.
4. Покинтелица Н. И. Пластическое деформирование при термической обработке материалов / Н. И. Покинтелица, Ю. О. Стреляная, М. И. Братан // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. - 2022. - № 3 (77). - С. 188-191.
5. Покинтелица, Н. И. Методология обеспечения повышения эффективности фрикционного формообразования поверхностей / Н. И. Покинтелица, М. И. Братан, Ч. Ф. Якубов // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2023. – № 1(79). – С. 252-260. – DOI 10.34771/UZCEPU.2023.79.1.050.
6. Суслов А. Г. Исследование поверхностей с различной механической обработкой на уровне субшероховатости / А. Г. Суслов, М. Г. Шалыгин, С. В. Кузнецов // Научные технологии в машиностроении. – 2015. – № 9(51). – С. 45-47.
7. Sherov K., Kuanov I., Imanbaev Ye., Mussayev M. et al. The investigation and improvement of the hardness of the clad surface by thermal friction milling methods // International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. 2022. Vol. 11, Iss. 10. P. 784-792. DOI: 10.18178/ijmerr.11.10.784-792 EDN: DDIMPC
8. Zahaf M. Z., Benghersallah M., Amirat A. Surface roughness and vibration analysis in end milling of annealed and hardened bearing steel // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020. Vol. 111. P. 525-535. DOI: 10.1016/j.measen.2020.100035 EDN: HJIWJB.
9. Sips K., Lopez M., Trucco M. Surface martensite white layer produced by adhesive sliding wear friction in AISI 1065 steel // Rev Latinoam Metal Mater. 2008. Vol. 28, Iss. 1. P. 46-50.
10. Momeni A., Arabi H., Rezaei A., Badri H. et al. Hot deformation behavior of austenite in HSLA-100 microalloyed steel // Materials Science and Engineering: A. 2011. Vol. 528, Iss. 4-5. P. 2158-2163. DOI: 10.1016/j.msea.2010.11.062 EDN: ONDUSV.
11. Братан С.М. Обеспечение стабильности обработки поверхностей на операциях круглого наружного шлифования с позиций системного анализа / С.М. Братан, А.О. Харченко, Д.А. Лысенко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева». – 2023. – №1(357). – С. 84-93.

#### **Братан Сергей Михайлович**

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь,  
Профессор кафедры «Технология машиностроения»  
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33  
serg.bratan@gmail.com

#### **Чингиз Февзиевич Якубов**

ГБОУ ВО РК «Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова», Симферополь  
Доцент кафедры «Технология машиностроения»  
295015, г. Симферополь, пер. Учебный, 8  
yakubov\_chingiz@mail.ru

#### **Покинтелица Николай Иванович**

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь,  
Профессор кафедры «Пищевые технологии и оборудование»  
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33  
nik.pokintelitsa@mail.ru

#### **Часовитина Анастасия Сергеевна**

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь,  
Аспирант кафедры «Технология машиностроения»  
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33  
nastya.chasovitina@mail.ru

S.M. BRATAN, N.I. POKINTELITSA, CH.F. YAKUBOV, A.S. CHASOVITINA

## THE METHOD OF MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE EVALUATION OF THE GEOMETRY OF THE TOOL CONSIDERING THE THERMOPHYSICAL PARAMETERS

**Abstract.** *The article describes the shape of the instrument using functional sequences (series). The mathematical description of the micro- and macrogeometry of the tool and parts, as well as the description of the thermophysical parameters, is carried out using functional series based on special functions. Fourier series and series composed of hyperbolic functions are used for cylindrical surfaces, and Fourier–Bessel series are used for the end surfaces of the tool. The thermophysical parameters for the description are the temperature along the plane of the disc and the temperature of the liquid metal, as well as the radial and tangential projections of the heat flux occurring in the volume of the cutting disc. Methods for evaluating the geometry of various types of tools have been developed.*

**Keywords:** *geometric parameters, thermophysical parameters, tool.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Pokintelitsa N. Thermophysical processes in thermofriction working of surfaces / N. Pokintelitsa, E. Levchenko // Materials Today: Proceedings IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 709 022008 IOP Publishing. – 2020.
2. Balakin V.A. Trenie i iznos pri vysokih skorostyah skoljeniya / V.A. Balakin. M.: Mashinostroenie, 1980. – 136 s.
3. Nasad T. G. Iznos lezviinogo instrumenta pri vysokoskorostnoi obrabotke s dopolnitelnim teplovim vozdeistviem / T. G. Nasad // Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2005. – № 1 (6). – S. 80 – 84.
4. Pokintelitsa N. I. Plasticheskoe deformirovanie pri termicheskoy obrabotke materialov / N. I. Pokintelitsa, Yu. O. Strelyanaya, M. I. Bratan // Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta. - 2022. - № 3 (77). - S. 188-191.
5. Pokintelitsa, N. I. Metodologiya obespecheniya povysheniya effektivnosti frikcionnogo formoobrazovaniya poverhnostej / N. I. Pokintelitsa, M. I. Bratan, Ch. F. Yakubov // Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta. – 2023. – № 1(79). – S. 252-260. – DOI 10.34771/UZCEPU.2023.79.1.050.
6. Suslov A. G. Issledovanie poverhnostei s razlichnoi mekhanicheskoi obrabotkoi na urovne subsherohovatosti / A. G. Suslov, M. G. Shalygin, S. V. Kuznetsov // Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii. – 2015. – № 9(51). – S. 45-47.
7. Sherov K., Kuanov I., Imanbaev Ye., Mussayev M. et al. The investigation and improvement of the hardness of the clad surface by thermal friction milling methods // International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. 2022. Vol. 11, Iss. 10. P. 784-792. DOI: 10.18178/ijmerr.11.10.784-792 EDN: DDIMPC
8. Zahaf M. Z., Benghersallah M., Amirat A. Surface roughness and vibration analysis in end milling of annealed and hardened bearing steel // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020. Vol. 111. P. 525-535. DOI: 10.1016/j.measen.2020.100035 EDN: HJIWJB.
9. Sipoš K., Lopez M., Trucco M. Surface martensite white layer produced by adhesive sliding wear friction in AISI 1065 steel // Rev Latinoam Metal Mater. 2008. Vol. 28, Iss. 1. P. 46-50.
10. Momeni A., Arabi H., Rezaei A., Badri H. et al. Hot deformation behavior of austenite in HSLA-100 microalloyed steel // Materials Science and Engineering: A. 2011. Vol. 528, Iss. 4-5. P. 2158-2163. DOI: 10.1016/j.msea.2010.11.062 EDN: ONDUSV.

#### Bratan Sergey Mikhailovich

Sevastopol State University, Sevastopol  
Professor of the department of Mechanical Engineering  
299053, Sevastopol, Universitetskaya str., 33  
serg.bratan@gmail.com

#### Pokintelitsa Nikolai Ivanovich

Sevastopol State University, Sevastopol  
Professor of the department of Food Technology and Equipment  
299053, Sevastopol, Universitetskaya str., 33  
nik.pokintelitsa@mail.ru

#### Chingiz Fevzievich Yakubov

Crimean State Engineering Pedagogical University, Simferopol  
Associate Professor of the department of Mechanical Engineering  
295015, Simferopol, Uchebnii lane, 8  
yakubov\_chingiz@mail.ru

#### Chasovitina Anastasia Sergeevna

Sevastopol State University, Sevastopol  
Postgraduate student of the department of Mechanical Engineering  
299053, Sevastopol, Universitetskaya str., 33  
nastya.chasovitina@mail.ru

О.Г. КОЖУС, Г.В. БАРСУКОВ, Т.А. ЖУРАВЛЕВА,  
Е.А. ПРАСОЛОВ, А.В. ПЕТРУХИН, М.Э. БОНДАРЕНКО

## ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ГИДРОАБРАЗИВНОГО РЕЗАНИЯ ЗА СЧЕТ МОДИФИКАЦИИ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ В КАНАЛЕ СОПЛА

**Аннотация.** В статье приведены расчеты и результаты моделирования, направленные на снижение гидравлического сопротивления сопла гидроабразивной установки путем профилирования стенок канала и введения поверхностно-активных веществ (ПАВ), что позволяет улучшить динамику процесса резания материалов.

**Ключевые слова:** гидроабразивное резание, сопло, фокусирующая трубка, гидравлическое сопротивление, ПАВ

### Введение

Гидроабразивная резка (ГАР) — это процесс обработки широкого спектра материалов от мягких, таких как резина, кожа, до твердых, таких как металлы [1, 2]. Резание материалов осуществляется гидроабразивной струей, сформированной соплом, в котором происходит смешивание абразива с высокоскоростной струей жидкости. В результате воздействия абразива на заготовку происходит разделение обрабатываемого материала [3, 4]. Стандартное оборудование ГАР создает давление воды до 400 МПа, а для формирования гидроабразивной струи с абразивными частицами от 0,07 мм до 0,35 мм обычно применяют фокусирующие трубки диаметром от 0,08 мм до 1 мм [5]. В сопле гидроабразивной установки абразив смешивается в специальной камере с высокоскоростной струей. Абразивные частицы после смесительной камеры ускоряются и фокусируются в трубке сопла. Ширина фокусирующей трубки определяет ширину резки, которая находится в пределах от 0,5 мм до 1,5 мм.

В статье для повышения динамики процесса резания предлагается применить методы модификации турбулентного пограничного слоя в канале сопла установки для гидроабразивного резания, что имеет важное научное и практическое значение. При более высокой скорости гидроабразивной струи появляется возможность резать более твердые и толстые материалы, выполнять точный раскрой благодаря наличию более высокой плотности энергии. Кроме того, ожидается снижение затрат на резку в результате более высокой скорости подачи сопла или снижения расхода абразива.

### 1. Основная часть

Согласно двухслойной модели Л.Прандтля турбулентный поток разделяется на вязкий подслой (ВП) и турбулентное ядро течения. Для течений в трубках существует только один путь уменьшения гидродинамического сопротивления трения — это увеличение толщины ВП [6], к этому сводятся способы снижения турбулентного трения за счет модификации стенок канала и введения гидродинамически-активных добавок (ПАВ, полимеров и др.).

Как известно [7] явление отрыва потока жидкости в турбулентном течении происходит при больших углах поворота потока  $\alpha \geq 10 - 15^\circ$ . При проектировании формы фокусирующей трубки сопла гидроабразивной установки будем предполагать, что его внутренний профиль является телом вращения (рисунок 1) с переменным радиусом сечения  $r(x)$ .

Рассмотрим поворот потока вдоль стенок фокусирующей трубки, осуществляемый последовательностью ломаных линий:

$$r(x) = r(x_k) + \lambda(r(x_{k+1}) - r(x_k)), \quad (1)$$
$$0 \leq \lambda \leq 1, \quad k = 0, 1, 2, \dots, n.$$

На каждом из участков на отрезках  $[x_{k-1}, x_k]$  и  $[x_k, x_{k+1}]$  и т. д. изменение радиуса описывается линейной функцией от  $x$ . Длина отрезка  $[x_k, x_{k+1}]$  должна выбираться значительно большей толщины пограничного слоя, при этом поворот участка  $[x_k, x_{k+1}]$  относительно участка  $[x_{k-1}, x_k]$  не должен превышать угла  $\Delta\alpha \approx 1 - 3^\circ$ . Эти два условия обеспечивают

безотрывное течение потока от формирующих стенок сопла при переходе от одного участка к другому.

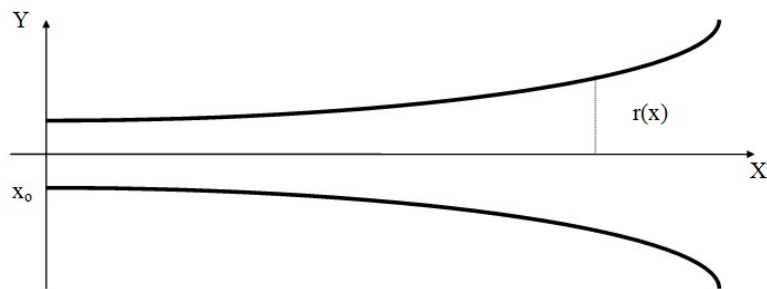


Рисунок 1 – Схема входного участка фокусирующей трубки сопла

Для толщины пограничного слоя  $\delta$  справедливо уравнение [7]:

$$\delta = 0,3x\sqrt{c}, \quad (2)$$

где  $x$  – расстояние от начала расширения сопла;  
 $c$  – коэффициент сопротивления, определяемый из уравнения:

$$\sqrt{\frac{2\chi^2}{c}} = \ln cR_x, \quad (3)$$

$$R_x = \frac{ux}{\nu},$$

где  $u$  – скорость потока жидкости,  
 $\nu$  – кинематическая вязкость жидкости,  
 $\chi = 0,4$ .

Уравнение (3) решается численно. Обозначим длину участка  $[x_{k-1}, x_k]$  через  $d_k$ , тогда длина отрезка  $[x_{k-1}, x_k]$  должна удовлетворять уравнению:

$$d_k \geq \alpha x_k \sqrt{c} \quad (4)$$

$$\alpha \approx 10 - 50^\circ.$$

Из формулы (4) следует, что длина участков  $d_k$  возрастает по мере расширения сопла. Таким образом, точки  $x_k$  определяются уравнением:

$$x_k = x_{k-1} + d_k, \quad k = 1, 2, \dots, n.$$

где  $d_k$  - определяется уравнением (4).

Для создания гладкой внутренней поверхности сопла рассмотрим множество точек  $r(x_k)$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$ .

$$r(x_k) = r(x_{k-1}) + \operatorname{tg} \Delta \alpha d_k. \quad (5)$$

Проведем через точки  $r(x_k)$  ( $k = 1, 2, \dots, n$ ) сплайн-функцию  $q(x)$ , которая удовлетворяет следующим условиям (рисунок 2):

$$q(x_k) = r(x_k), \quad k = 1, 2, \dots, n;$$

$q(x_k)$  – дважды непрерывно дифференцируемая функция;

$$q''(x_0) = q''(x_n) = 0.$$

Тогда фокусирующая трубка сопла, как тело вращения с радиусом сечения  $q(x)$  обеспечивает гладкую поверхность. Решение задачи сплайн интерполяции определяется уравнениями [8]:

$$q(x) = m_{i-1} \frac{(x_i - x)^3}{6h_i} + m_i \frac{(x - x_{i-1})^3}{6h_i} + \left( r(x_{i-1}) - \frac{m_{i-1}h_i^2}{6} \right) \frac{x_i - x}{h_i} + \left( r(x_i) - \frac{m_i h_i^2}{6} \right) \frac{x - x_{i-1}}{h_i}. \quad (6)$$

$$h_i = x_i - x_{i-1}, x_i \leq x \leq x_{i+1}, i = 1, 2, \dots, n.$$

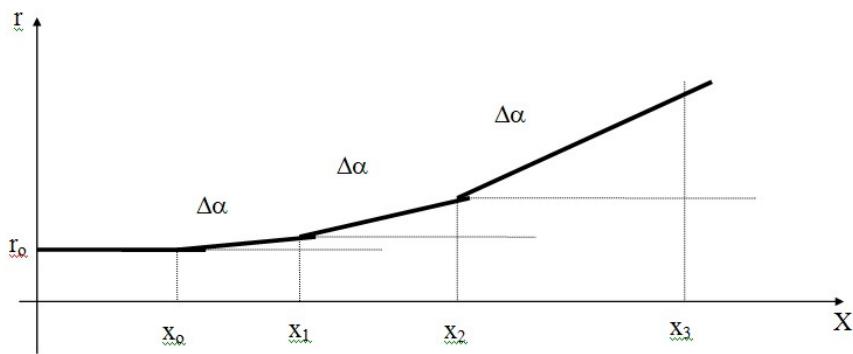


Рисунок 2 - Формирование внутреннего профиля фокусирующей трубки сопла ломанными линиями

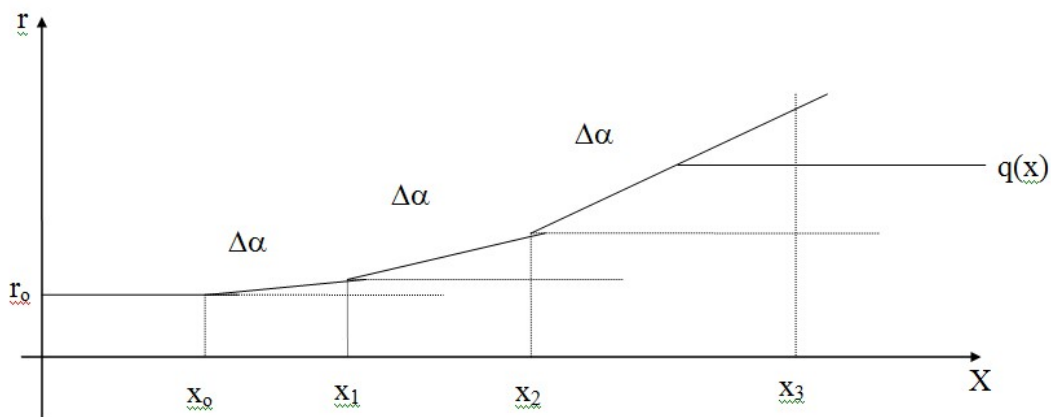


Рисунок 3 - Сплайн интерполяция ломаной поверхности внутреннего профиля фокусирующей трубки сопла

Коэффициенты  $m_i$  удовлетворяют системе уравнений с трехдиагональной матрицей:

$$\left. \begin{aligned} \frac{h_i}{6} m_{i-1} + \frac{h_i + h_{i+1}}{3} m_i + \frac{h_{i+1}}{6} m_{i+1} &= \\ &= \frac{r(x_{i+1}) - r(x_i)}{h_{i+1}} - \frac{r(x_i) - r(x_{i-1}))}{h_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n-1. \end{aligned} \right\}$$

$$m_0 = m_n = 0. \quad (7)$$

Уравнения (7) решаются методом прогонки или факторизации [9]. Введем замены:

$$a_i = \frac{h_{i+1}}{6}, \quad b_i = \frac{h_i + h_{i+1}}{3}, \quad c_i = \frac{h_{i+1}}{6}, \quad \varphi_i = \frac{r(x_{i+1}) - r(x_i)}{h_{i+1}} - \frac{r(x_i) - r(x_{i-1}))}{h_i}.$$

Решение будем искать в виде:

$$m_i = \beta_{i+1} m_{i+1} + z_{i+1}, \quad i = 1, 2, \dots, n-2. \quad (8)$$

Для коэффициентов  $\beta_{i+1}, z_{i+1}$  имеем следующие уравнения:

$$\begin{aligned} \beta_2 &= -\frac{c_1}{b_1}, & z_2 &= \frac{\varphi_1}{b_1}, \\ \beta_{i+1} &= -\frac{c_i}{(a_i \beta_i + b_i)}, & z_{i+1} &= \frac{(\varphi_i - a_i z_i)}{(a_i \beta_i + b_i)}. \end{aligned} \quad (9)$$

Уравнения (9) определяют ход метода прогонки. Далее получаем:

$$m_{i-1} = \frac{\varphi_{i-1} a_{i-1} z_{i-1}}{a_{i-1} \beta_{i-1} + b_{i-1}}, \quad (10)$$

$$m_i = \beta_{i+1} m_{i+1} + z_{i+1}, \quad i = n-2, n-1, \dots, 1.$$

Уравнения (10) определяют обратный ход метода факторизации. После нахождения коэффициентов  $m_i, i = 1, 2, \dots, n-1$  сплайн  $q(x)$  определяется уравнением (6).

Для обеспечения безотрывного течения потока жидкости в фокусирующей трубке сопла необходимо определить уравнение переходного участка, воспользовавшись уравнением неразрывности для установившегося течения в цилиндрических координатах  $(x, r)$  [10]:

$$\frac{\partial}{\partial x}(rpu) + \frac{\partial}{\partial r}(rpv) = 0, \quad (11)$$

где  $u, v$  – проекции скорости потока соответственно на оси  $x$  и  $r$ .

Расположим систему координат так, чтобы ось  $x$  совпадала с осью сопла, а вход в переходную часть находился в начале координат.

Примем распределение скорости потока вдоль оси переходного участка равномерным:

$$u_o = u_1 + u_2 x = u_2 \left( \frac{1}{n} + x \right), \quad (12)$$

где  $u_1$  – скорость жидкости на входе в переходной участок;  
 $u_2$  – скорость жидкости на выходе из переходного участка;  
 $x$  – текущая координата,  $x$  от 0 до  $\ell$ ;  
 $n$  – коэффициент поджатия переходного участка.

Учитывая, что функция тока должна быть равномерной [11], получим уравнение криволинейного переходного участка:

$$r = \frac{d_{kp}}{\sqrt{\frac{1}{n} + x}}. \quad (13)$$

Определив оптимальную форму переходного участка, следует ввести ряд параметров для проектирования коническо-цилиндрического профиля фокусирующей трубки.

Коэффициент поджатия переходного участка будет зависеть от угла раскрытия конической части, поэтому следует задать границы его определения.

Полагая, что сходящаяся коническая образующая должна плавно переходить в криволинейную переходную часть в точке  $x = 0$ , получим:

$$n = \sqrt[3]{\frac{4tg^2\theta}{d_{kp}^2}}. \quad (14)$$

Величина  $\ell_n$  является переменной вследствие изменения степени поджатия переходного участка от угла сходимости  $\theta$ :

$$\ell_n = 1 - 1/n. \quad (15)$$

Для моделирования движения потока жидкости модифицированного ПАВ в канале фокусирующей трубки гидроабразивной установки использовали программное обеспечение Fluent. Основным подходом при моделировании являлось решение уравнений Навье-Стокса методом контрольных объемов. В качестве входных геометрических (конструктивных) данных используется сеточное разбиение области течения. За центр контрольного объема принимается непосредственно центр ячейки сеточного разбиения.

При построении модели движения потока жидкости модифицированного ПАВ применена модель турбулентности переноса напряжения сдвига SST с двумя уравнениями вихревой вязкости. Модель сочетает в себе модель турбулентности k-omega и модель турбулентности k-epsilon, таким образом, что k-omega используется во внутренней области пограничного слоя и переключается на k-epsilon при свободном сдвиговом течении.



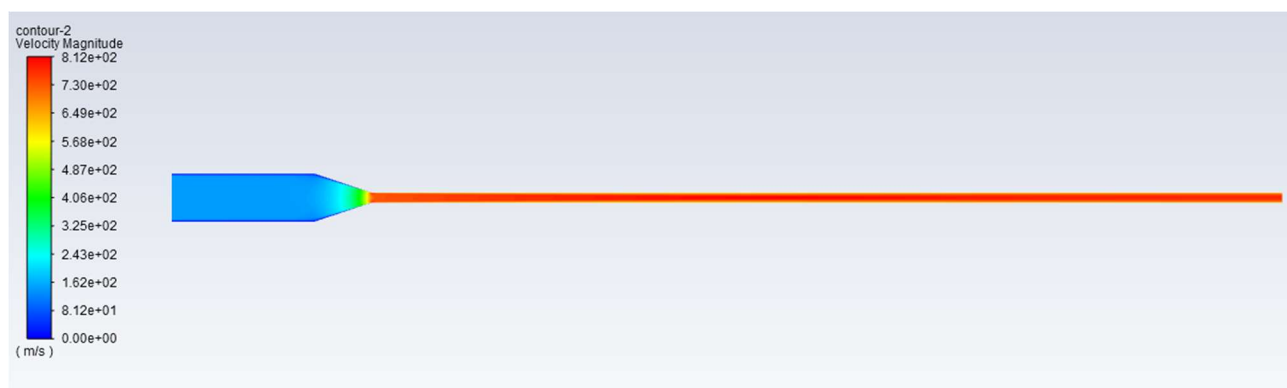
Поле скоростей вычислялось на основе уравнения моментов, а поле давления рассчитывалось путем решения уравнений для давления, которое является следствием уравнения неразрывности и уравнения моментов с применением решателя Pressure-Based.

Параметры для моделирования: Time type: steady; материал – вода. Граничные условия: на входе - если давление, то абсолютное, а если скорость, то задается нормальная магнитуа скорости по всей границе. Интенсивность турбулентности на границе 5%, отношение турбулентных вязкостей (turbulent viscosity ratio) равно 10. Граничные условия на выходе: давление 1 атм, Общее условие для расчетной области - reference pressure = 1 атм (это базовое давление). На стенке граничное условие - specified shear.

Проведено моделирование скорости потока жидкости в фокусирующей трубке диаметром 0,76 мм и длиной 76 мм без камеры смешивания (рисунок 4) и с камерой смешивания (рисунок 5).



*Рисунок 4 – Моделирование скорости движения потока жидкости в фокусирующей трубке сопла*



*Рисунок 5 – Моделирование скорости движения потока жидкости в фокусирующей трубке сопла с камерой смешивания*

Результаты моделирования показывают, что наибольшая скорость потока наблюдается на входе в фокусирующую трубку, а скорость потока постепенно снижается вдоль оси трубки и достигает минимальной скорости на выходе. Кроме этого, скорость потока в поперечном сечении канала трубки постепенно снижается в радиальном направлении сечения и доходит до минимальной скорости на стенке канала. Наблюдается снижение скорости потока жидкости при наличии камеры смешивания (таблица 1).

Введение в поток жидкости с абразивом весьма малых добавок ПАВ является одним из эффективных способов снижения гидравлического сопротивления. При этом происходит увеличение толщины пограничного слоя потока – как ламинарного подслоя, находящегося у самой стенки канала сопла, так и переходного слоя, расположенного между ламинарным подслоем и турбулентным ядром потока. По мере увеличения концентрации добавок ПАВ толщина переходного слоя возрастает. Молекулы применяемых ПАВ представляют собой длинные молекулярные образования мицеллы, длиной, в десятки тысяч раз превышающей их

поперечный размер. Вблизи стенок мицеллы ориентируются преимущественно по направлению движения потока и образуют гибкую поверхность. Добавки ПАВ уменьшают градиент скорости вблизи стенок канала сопла, кроме этого, поверхность, создающаяся из молекул введенных добавок вблизи стенок канала, способствует значительному уменьшению (в 4–5 раз) интенсивности пульсации поперечной составляющей скорости, в результате чего уменьшаются касательные напряжения. Силы, удерживающие молекулы ПАВ в мицеллах продолжают действовать даже после того, как мицеллы претерпевают разрушение под действием сдвига, происходит их самосборка. Катионные ПАВ для водной среды вообще не подвергаются полной механической деструкции.

Таблица 1 – Скорость потока в фокусирующей трубке сопла

Вариант случая	Максимальная скорость потока на выходе из сопла, м/с	Максимальная скорость потока, м/с	Расход через выходное отверстие сопла, м <sup>3</sup> /с
Без камеры смешивания	762	815	0,5461
С камерой смешивания	756	812	0,7429

При добавке в воду весьма незначительного количества некоторых ПАВ наблюдается резкое снижение гидравлического сопротивления в турбулентном режиме течения. Так, результаты моделирования движения потока жидкости в фокусирующей трубке сопла показали, что при течении чистой жидкости максимальная скорость на выходе из фокусирующей трубки составляет 768 м/с, а при введении ПАВ, способствующему снижению пристеночного гидравлического сопротивления, скорость потока растет на 15% до 899 м/с (таблица 2). Следует подчеркнуть, что этот эффект возникает при столь малых концентрациях добавок, что все физические свойства жидкости остаются такими же, как и у чистой воды.

Таблица 2 - Скорость потока в фокусирующей трубке сопла при введении поверхностно-активных веществ (ПАВ)

Параметр	Напряжение сдвига на стенке канала						
	$6 \times 10^5$ Па	$5 \times 10^5$ Па	$4 \times 10^5$ Па	$3 \times 10^5$ Па	$2 \times 10^5$ Па	$1 \times 10^5$ Па	0
Макс скорость, м/с	810	848	864	879	906	946	999
Макс скорость на выходе, м/с	768	813	838	866	891	899	898
Скорость на стенке, м/с	0	50	75	200	340	540	873
Расход, м <sup>3</sup> /с	0,73	0,77	0,8	0,82	0,85	0,88	0,91

### Заключение

Показана возможность снижения гидравлического сопротивления сопла гидроабразивной установки путем профилирования стенок канала и введения поверхностно-активных веществ (ПАВ), что позволяет улучшить динамику процесса резания материалов. При более высокой скорости гидроабразивной струи появляется возможность резать более твердые и толстые материалы, выполнять точный раскрой благодаря наличию более высокой плотности энергии. Кроме того, ожидается снижение затрат на резку в результате более высокой скорости подачи сопла или снижения расхода абразива. Спроектирована форма канала фокусирующей трубки сопла гидроабразивной установки внутренний профиль, которого является телом вращения с переменным радиусом сечения, что позволило обеспечить безотрывное течение потока жидкости в турбулентном течении в канале трубки. Введение в поток жидкости с абразивом весьма малых добавок ПАВ является одним из эффективных способов снижения гидравлического сопротивления. Результаты

моделирования показывают, что при добавке в воду весьма незначительного количества ПАВ наблюдается резкое снижение гидравлического сопротивления фокусирующей трубки в турбулентном режиме течения. Отмечается, что наибольшая скорость потока наблюдается на входе в фокусирующую трубку, а скорость потока постепенно снижается вдоль оси трубки и достигает минимальной скорости на выходе.

*Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 23-79-10245.*

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. 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.
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. 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.
4. 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.
5. Барсуков Г.В., Селеменев М.Ф., Кравченко И.Н., Журавлева Т.А., Селеменова Е.М., Бармина О.В., Петровский Д.И. Влияние параметров химико-термической обработки частиц медного шлака на качество гидроабразивного резания // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2022. № 4. С. 22-30.
6. Кутателадзе С.С. Пристенная турбулентность. Наука. - 1973. - 228 с.
7. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика, т. 7. Гидродинамика. - М.: Наука, 1988. - 733 с.
8. Марчук Г. И. Методы вычислительной математики. - М.: Наука, 1989. - 302 с.
9. Оптнер И. В. Системный анализ для решения деловых и промышленных проблем. - М.: Советское радио, 1969. - 216 с.
10. Аверин С. И., Минаев А. Н., Швыдкий В. С., Ярошенко Ю. Г. Механика жидкости и газа. - М.: Металлургия, 1987. - 304 с.
11. Беляев С. В., Петко И. В. К расчету профиля канала струеформирующего сопла гидрорезной установки высокого давления // Изв. вузов. Технология легкой промышленности, 1988. - №3/183. - С. 104-106.

### **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

### **Прасолов Егор Александрович**

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

### **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

### **Петрухин Антон Владимирович**

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

### **Бондаренко Максим Эдуардович**

Орловский государственный университет  
имени И.С. Тургенева,  
Доцент кафедры мехатроники, механики и  
робототехники  
г. Орёл Наугорское шоссе, д. 29  
maxbondarenko22@yandex.ru

O.G. KOZHUS, G.V. BARSUKOV, T.A. ZHURAVLEVA,  
E.A. PRASOLOV, A.V. PETRUKHIN, M.E. BONDARENKO

## INCREASED WATERJET CUTTING PRODUCTIVITY DUE TO TURBULENT MODIFICATION BOUNDARY LAYER IN THE NOZZLE CHANNEL

**Abstract.** *The article presents calculations and modeling results aimed at reducing the hydraulic resistance of the nozzle of a water-abrasive installation by profiling the channel walls and introducing surfactants, which makes it possible to improve the dynamics of the material cutting process.*

**Keywords:** *waterjet cutting, nozzle, focusing tube, hydraulic resistance, surfactant.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Belov V.A., Veltishchev V.V., Galinovskiy A.L., Ilyukhina A.A., Mugla D.R. Experimental determination of rational parameters of the elements of the jet-forming path of an installation for underwater waterjet cutting of materials // Bulletin of the Bryansk State Technical University. 2018. No. 7 (68). pp. 4-12.
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. 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). pp. 50-58.
4. 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.
5. Barsukov G.V., Selemenov M.F., Kravchenko I.N., Zhuravleva T.A., Selemenova E.M., Barmina O.V., Petrovsky D.I. Influence of parameters of chemical-thermal treatment of copper slag particles on the quality of water-jet cutting // Problems of mechanical engineering and automation. 2022. No. 4. pp. 22-30.
6. Kutateladze S.S. Wall turbulence. The science. - 1973. - 228 p.
7. Landau L. D., Lifshits E. M. Theoretical physics, vol. 7. Hydrodynamics. - M.: Nauka, 1988. - 733 p.
8. Marchuk G.I. Methods of computational mathematics. - M.: Nauka, 1989. - 302 p.
9. Optner I.V. System analysis for solving business and industrial problems. - M.: Soviet radio, 1969. - 216 p.
10. Averin S.I., Minaev A.N., Shvydkiy V.S., Yaroshenko Yu.G. Mechanics of fluid and gas. - M.: Metallurgy, 1987. - 304 p.
11. Belyaev S.V., Petko I.V. Calculation of the channel profile of the jet-forming nozzle of a high-pressure hydraulic cutting unit // Izv. universities Technology of light industry, 1988. - №3/183. - pp. 104-106.

#### Kozhus Olga Gennadiyevna

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

#### 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

#### 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

#### Petrukhin Anton Vladimirovich

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

#### Bondarenko Maxim Eduardovich

Oryol State University  
named after I.S. Turgenev,  
Associate Professor of the Department of Mechatronics,  
Mechanics and Robotics  
Orel Naugorskoe highway, 29  
maxbondarenko22@yandex.ru

А.В. НЕМЕНКО, М.М. НИКИТИН

## ФИНИШНАЯ ОБРАБОТКА ОБТЕКАТЕЛЯ СУДОВОГО ГРЕБНОГО ВИНТА

**Аннотация.** Для построения обтекателей судовых гребных винтов часто используются поверхности вращения второго порядка. Вместе с тем, их финишная обработка в общем случае требует переменного съёма материала по радиусу изделия при достаточно жестких требованиях к распределению масс готовой детали. В настоящее время отсутствует единый стандарт на допуски обтекателей судовых гребных винтов, выполненных по поверхностям второго порядка. Теоретическое обоснование единой технологии, вместе с развитыми стандартами присутствует в точном приборостроении, но применяемые там подходы не могут быть механически перенесены в машиностроительные технологии вследствие очень высокой трудоемкости. В настоящей работе приведена математическая спецификация поверхностей, пригодных для производства обтекателя гребного винта, проведен обзор методов получения таких поверхностей и выделены направления преодоления проблемных мест технологии серийного производства обтекателей достаточно высокой точности.

**Ключевые слова:** гребной винт, обтекатель ступицы, параболоид, эллипсоид, гиперболоид, поверхность вращения.

### Введение.

Для обеспечения заданных гидродинамических характеристик судового движителя требуется соответствие фактической геометрии его поверхностей расчетным формам [1]. Одной из поверхностей гребного винта является обтекатель, выполняемый обычно в виде тела вращения и служащий для повышения гидродинамического коэффициента полезного действия. Для построения обтекателя часто используются неразвёртываемые поверхности вращения второго порядка – сфера, эллипсоид, параболоид и гиперболоид вращения.

Особенностями построения обтекателя являются, во-первых, достаточная жесткость, противодействующая его деформациям при работе в условиях качки и вибрации, во-вторых, необходимость балансировки с высокой точностью с целью исключения передачи переменных динамических нагрузок на подшипники линии вала.

В процессе эксплуатации обтекатель гребного винта находится в области пониженного давления, что инициирует возникновение кавитационных явлений и связанной с ними эрозии поверхностей.

Вместе с тем, задача получения таких поверхностей с заданной точностью достаточно сложна и приводит к вероятностному характеру исхода.

Для отдельных задач в настоящее время эта вероятность близка к единице (получение сферических поверхностей любого класса шероховатости), но для многих других она существенно меньше (эллипсоиды, параболоиды и гиперболоиды с большой кривизной и малым отклонением от расчетного профиля), что затрудняет их серийное производство, или же настолько мала, что приводит к практической невозможности изготовления таких поверхностей даже в исключительных случаях [2].

### Основная часть.

Для систематизации данных о существующих в настоящее время технологиях формирования поверхностей дадим единое математическое описание этих поверхностей. Будем рассматривать поверхности, полученные вращением относительно оси симметрии следующих кривых: а) окружность, б) эллипс, в) парабола, г) гипербола.

При этом вращение эллипса происходит так, что с осью вращения совпадает большая полуось, гиперболы – так, что с осью вращения совпадает действительная полуось.

Рассмотрим эти поверхности в евклидовом пространстве с базисом  $\{i, j, k\}$ , соответствующем координатам  $\{x, y, z\}$ , причем во всех случаях вершина поверхности полагается совпадающей с началом координат, вращение происходит относительно оси  $z$ .

Выпуклость и вогнутость физически получаемой поверхности примем совпадающими с аналитически определяемыми из уравнения выпуклостью и вогнутостью, в частности, с получаемыми по знаку полной второй производной.

Так, если получаемое уравнение описывает геометрически выпуклую поверхность, то обработке считается доступной выпуклая сторона двусторонней математической поверхности, если вогнутую, то вогнутая сторона. Известно, что все перечисленные поверхности второго порядка постоянного знака кривизны, то есть, находясь на их вогнутой стороне, нельзя попасть на выпуклую, не пересекая поверхности, и не отрываясь от неё, и наоборот, что определяет единственность приводимого ниже описания.

Обозначим в рассматриваемых координатах

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}. \quad (1)$$

В результате получим следующие уравнения поверхностей

1. Внутренняя поверхность полусферы радиуса  $R$ :

$$z = R - \sqrt{R^2 - r^2}, r \in [-R, R]. \quad (2)$$

2. Внешняя поверхность полусферы радиуса  $R$ :

$$z = \sqrt{R^2 - r^2} - R, r \in [-R, R]. \quad (3)$$

3. Внутренняя поверхность половины эллипсоида с полуосями  $a$  и  $b$ ,  $a > b$

$$z = a - \frac{a \cdot \sqrt{b^2 - r^2}}{b}. \quad (4)$$

4. Внешняя поверхность половины эллипсоида с полуосями  $a$  и  $b$ ,  $a > b$

$$z = \frac{a \cdot \sqrt{b^2 - r^2}}{b} - a. \quad (5)$$

5. Внутренняя поверхность параболоида с фокусным расстоянием  $F$

$$z = \frac{r^2}{4F}, r \in (-\infty, \infty). \quad (6)$$

6. Внешняя поверхность параболоида с фокусным расстоянием  $F$

$$z = -\frac{r^2}{4F}, r \in (-\infty, \infty). \quad (7)$$

7. Внутренняя поверхность полости двуполостного гиперboloида с полуосями  $a$  и  $b$ ,  $a$  – действительная полуось

$$z = \frac{a \cdot \sqrt{b^2 + r^2}}{b} - a, r \in (-\infty, \infty). \quad (8)$$

8. Внешняя поверхность полости двуполостного гиперboloида с полуосями  $a$  и  $b$ ,  $a$  – действительная полуось

$$z = a - \frac{a \cdot \sqrt{b^2 + r^2}}{b}, r \in (-\infty, \infty). \quad (9)$$

Отметим, что в составленном описании выпуклым (внешним) поверхностям соответствует отрицательный знак вычисляемой аппликаты (за исключением точки в начале координат, у которой значение аппликаты равно нулю), вогнутым (внутренним) поверхностям соответствует её положительный знак.

Запишем уравнения (2) – (9) для случая, когда все поверхности имеют один и тот же вершинный радиус кривизны.

Оставив без изменения формулы (2) и (3), преобразуем уравнения (4) и (5), используя известные формулы для выражения полуосей эллипса через его эксцентриситет и меньший из вершинных радиусов кривизны:

$$a = \frac{R}{\varepsilon^2 - 1} \quad (10)$$

$$b = \frac{R}{\sqrt{\varepsilon^2 - 1}}. \quad (11)$$

В результате получены формулы

$$z = \frac{R}{1 - \varepsilon^2} \cdot \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{r^2 \cdot (1 - \varepsilon^2)}{R^2}} \right), \quad (12)$$

для внутренней поверхности половины эллипсоида с эксцентриситетом  $\varepsilon$  и вершинным радиусом кривизны  $R$  и

$$z = -\frac{R}{1 - \varepsilon^2} \cdot \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{r^2 \cdot (1 - \varepsilon^2)}{R^2}} \right), \quad (13)$$

которая описывает внешнюю поверхность той же фигуры.

Формулы для параболоида (6) и (7) преобразуем к виду

$$z = \pm \frac{r^2}{2 \cdot R} \quad (14)$$

для вогнутой и выпуклой поверхностей соответственно.

Применим аналогичные соотношения для гиперболы:

$$a = \frac{R}{\varepsilon^2 - 1} \quad (15)$$

$$b = \frac{R}{\sqrt{\varepsilon^2 - 1}} \quad (16)$$

и получим, что формулы (8) и (9) так же переходят в формулы (12) и (13).

Представив эти формулы как функции эксцентриситета  $\varepsilon$ , можно найти, что пределы их при  $\varepsilon \rightarrow 1$  определяются формулой (14), что даёт, таким образом, универсальное описание аппликаты любой из рассматриваемых поверхностей через её эксцентриситет, вершинный радиус кривизны, абсциссу и ординату в виде формулы (12) для вогнутой и (13) для выпуклой поверхности с вершинами в начале координат.

Разложив (12) и (13) в ряд по степеням  $r$ , получим формулу

$$z = \mp \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(1 - \varepsilon^2)^{n-1} \cdot \prod_{i=0}^{n-1} (2 \cdot i - 1)}{2^n \cdot R^{2n-1} \cdot n!} \cdot r^{2n}, \quad (17)$$

что можно представить в виде

$$z = \mp \left\{ \frac{1}{2R} r^2 + \frac{(1 - \varepsilon^2)}{8R^3} r^4 + \frac{(1 - \varepsilon^2)^2}{16R^5} r^6 + \frac{5(1 - \varepsilon^2)^3}{128R^7} r^8 + \dots \right\}. \quad (18)$$

Таким образом, общее описание поверхности, по которой должна быть выполнена ступица, можно представить в виде

$$z = \pm \frac{R}{1 - \varepsilon^2} \cdot \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{(x^2 + y^2) \cdot (1 - \varepsilon^2)}{R^2}} \right) \quad (19)$$

с наибольшим отклонением от неё, лежащим в пределах обеспечиваемого класса шероховатости.

Изготовление ступицы включает получение отливки, снятие с нее припуска, предварительную проточку и финишную обработку с формированием требуемой поверхности.

В процессе финишной обработки деталей с рассмотренными поверхностями значительное применение находят операции шлифования и полирования. Частный случай поверхности второго порядка (сферическая поверхность) при шлифовании свободным абразивом получается автоматически, так как сфера является единственной поверхностью, общей для двух сопряжённых по ней звеньев, допускающей поворот вокруг произвольной оси, не деформируя каждое из звеньев. При обработке в роли таких звеньев выступают сама заготовка и сопряжённый с ней инструмент – шлифовальный, совершающие взаимные перемещения с той или иной кинематикой.

Отличием получения сферической и асферической поверхности является характер движения заготовки и инструмента: поворот в недеформированном состоянии одного относительно другого во втором случае возможен только вокруг оси симметрии поверхности.

Вместе с тем, ось мгновенного поворота должна постоянно меняться для сглаживания ошибок каждого прохода инструмента. Поэтому в большинстве применяемых методов получения асферических поверхностей движение инструмента также осуществляется с постоянно изменяющейся осью поворота, но, в зависимости от свойств конкретной поверхности и мгновенных координат инструмента, в процесс вводится контролируемое изменение интенсивности съёма материала. Иными словами, кинематика движений инструмента для получения асферической поверхности остается той же, что и для сферической, но материал он снимает по-другому за счет тех или иных воздействий оператора, и в результате на выходе получается заданная асферическая поверхность. Формализация этого воздействия и перевод его в алгоритмическую форму, пригодную для обработки с ЧПУ, в случае высокоточных асферических поверхностей до настоящего времени представляет значительные затруднения, так как требует знания трибологических свойств действительного режима обработки.

Другой проблемой обработки произвольных деталей до заданной точности является предотвращение их изгиба под действием технологических усилий обработки. В большинстве способов обработки она решается установкой детали на шпинделе станка с помощью системы многоопорной разгрузки. Количество опор выбирается таким, чтобы максимальный прогиб лежащей на них заготовки, нагруженной весом инструмента и дополнительным усилием обработки, не превосходил предельно допустимое для данного изделия значение. Эта технология не позволяет обрабатывать произвольно тонкие заготовки, так как необходимое количество опор оказывается слишком большим и реакция распределяется неравномерно, что вызывает искажения формы поверхности после снятия полученной детали с системы разгрузки. Учёт же фактических перемещений заготовки на каждой опоре и их компенсация выбором закона обработки практически невозможны, так как в большинстве шлифовально-полировальных станков инструмент в каждый момент времени перекрывает несколько опор под заготовкой, если не все их. Практически толщина заготовки для получаемой таким способом детали должна быть не менее  $1/10 - 1/15$  диаметра.

В настоящее время распространенным способом получения вогнутой параболической поверхности, является предварительное изготовление сферической поверхности и последующая параболизация полированием. Предварительная обработка поверхности до сферы к настоящему времени представляет собой хорошо воспроизводимую операцию, выполняемую автоматически. Последующая параболизация достигается неравномерным съёмом материала на различных радиусах заготовки. Процесс не детерминирован и требует контроля со стороны оператора с внесением при необходимости управляющих воздействий.

Контроль фактической формы поверхности при обработке проводится механическими либо оптическими методами в зависимости от требуемой точности поверхности. При периодически осуществляемом контроле трудоёмкость процесса пропорциональна наибольшей разности между образующими сферы и параболоида, называемой асферичностью. Эта величина, в свою очередь, линейно пропорциональна диаметру изделия и кубу его относительного отверстия, что ставит предел геометрическим характеристикам параболических оболочек, которые могут быть изготовлены данным способом.



Уменьшение дефектного изгиба готового изделия до величины, меньшей специфицированного значения, требует установки его в оправе прибора на систему многоточечной разгрузки, состоящую из подвижно соединенных звеньев. Наличие трения в их кинематических парах искажает передачу усилий от собственного веса детали на оправу и приводит к неконтролируемой деформации поля перемещений отдельных точек. В результате возникает некоторое целочисленное значение, выше которого увеличивать количество точек разгрузки оказывается нецелесообразным, так как дефектный изгиб будет проявляться в неравномерных провисаниях между несогласованными опорами.

Для переноса технологий изготовления изделий с поверхностями вращения второго порядка из области приборостроения в область машиностроительных технологий требуется решить следующие вопросы:

- взаимного перехода поверхностей второго порядка друг в друга при шлифовании и полировании профилированным инструментом, совершающим только вращательное движение;
- учёта изгиба деталей переменной толщины при закреплении на оснастке и его компенсации при обработке;
- количественной оценки влияния стохастических факторов при многостадийном получении поверхности второго порядка на вероятности благоприятного и неблагоприятного исходов обработки.

Первый вопрос был рассмотрен в работе [3], где было показано, что для поверхностей рассматриваемого класса возможно направленное движение от поверхности с меньшим эксцентриситетом к поверхности с большим с сохранением вершинного радиуса кривизны. Для этого требуется обработка в неподвижных осях с помощью специального многолепесткового инструмента с профилированными секторами и воздействию свободного либо связанного абразива.

Вопросы закрепления оболочки, выполненной по поверхности второго порядка, на оснастке, были рассмотрены в работах [4] и [5]. В частности, было показано, что свободный прогиб вертикально обрабатываемой поверхности так же при определенных условиях может способствовать изменению её эксцентриситета и вершинного радиуса кривизны при сохранении в пределах рассматриваемого класса.

Решению третьей из рассмотренных проблем посвящены работы [6] и [7], в которых процесс многостадийной финишной обработки представлен в виде марковского случайного блуждания в непрерывном пространстве состояний, которому соответствует область допустимой толщины обтекателя ступицы.

### **Выводы.**

В настоящей работе предложено теоретическое обоснование технологической схемы финишной обработки обтекателей судовых гребных винтов, конструкция которых разработана с использованием поверхностей вращения второго порядка.

Приведена математическая спецификация поверхностей, пригодных для производства обтекателей гребных винтов, а также представлен обзор методов получения таких поверхностей с достаточно высокой точностью

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Халявкин А.А. Оценка влияния упругих свойств капролоновых подшипников на угол контакты с гребным валом/ А.А. Халявкин, В.А. Гордон, М.В. Старкова, В.В. Бондаренко//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2023, №1(357),с.78 - 84.
2. Hernández-Delgado, J., Malacara-Hernández, Z., Malacara-Doblado, D., Vázquez-Dorrio, B., & Malacara-Hernández, D.. Local curvatures and its measurements of an optical surface or a wavefront: a review. *Optical Engineering*, 61(5), 2022, 050901-050901.
3. Неменко А.В. Управление процессом получения поверхностей второго порядка при финишной обработке/А.В. Неменко, М.М. Никитин//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2020, №4(342),С.52 – 58.
4. Неменко А.В. Управление финишной обработкой криволинейной поверхности по критерию геометрического соответствия/А.В. Неменко, М.М. Никитин//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2019, №4-1(336),с.191 - 196.
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. 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.

7. Alexandra V. Nemenko, Michael M. Nikitin. Forecast estimator of surface machining completion. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2019, vol. 709, # 022006

**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

A.V. NEMENKO, M.M. NIKITIN

## FINISHING OF THE SHIP'S PROPELLER FAIRING

**Abstract.** *To construct fairings for ship propellers, second-order rotation surfaces are often used. At the same time, their finishing generally requires variable material removal along the radius of the product with fairly stringent requirements for the mass distribution of the finished part. Currently, there is no uniform standard for the tolerances of ship propeller fairings made on second-order surfaces. The theoretical justification for a unified technology, together with developed standards, is present in precision instrument making, but the approaches used there cannot be mechanically transferred to mechanical engineering technologies due to their very high labor intensity. This paper provides a mathematical specification of surfaces suitable for the production of a propeller fairing, provides a review of methods for producing such surfaces, and identifies directions for overcoming problem areas in the technology of serial production of fairings of sufficiently high precision.*

**Keywords:** *propeller, hub fairing, paraboloid, ellipsoid, hyperboloid, surface of rotation.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Haljavkin A.A. Ocenka vlijanija uprugih svojstv kaprolonovyh podshipnikov na ugol kontakty s grebnym valom/ A.A. Haljavkin, V.A. Gordon, M.V. Starkova, V.V. Bondarenko//Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii, 2023, №1(357), s.78 - 84.

2. Hernández-Delgado, J., Malacara-Hernández, Z., Malacara-Doblado, D., Vázquez-Dorrio, B., & Malacara-Hernández, D. Local curvatures and its measurements of an optical surface or a wavefront: a review. Optical Engineering, 61(5), 2022, 050901-050901.

3. Nemenko A.V. Upravlenie processom poluchenija poverhnostej vtorogo porjadka pri finishnoj obrabotke/A.V. Nemenko, M.M. Nikitin//Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii, 2020, №4(342), S.52 – 58.

4. Nemenko A.V. Upravlenie finishnoj obrabotkoj krivolinejnoj poverhnosti po kriteriju geometricheskogo sootvetstvija/A.V. Nemenko, M.M. Nikitin//Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii, 2019, №4-1(336), s.191 - 196.

5. Nemenko A.V. Linejnaja rekonstrukcija polozhenija kontroliruемого ob#ekta/A.V. Nemenko, M.M. Nikitin//Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii, 2020, №4-2(342), S.136 – 140.

6. Nemenko A.V. Dal'nij prognoz jekspluatacionnoj nadezhnosti proizvodstvennoj sistemy/A.V. Nemenko, M.M. Nikitin//Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii, 2022, №4(354), s.58 - 64.

7. Alexandra V. Nemenko, Michael M. Nikitin. Forecast estimator of surface machining completion. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2019, vol. 709, # 022006

**Nemenko Alexandra Vasilyevna**

FSAEI HE Sevastopol State University, Sevastopol  
Ph.D. in Tech Science, assistant professor of chair «Digital Design»  
Universitetskayast, 33, Sevastopol, Russian Federation, 299053  
Phone. +79788330519  
E-mail: valesan@list.ru

**Nikitin Mikhail Mikhailovich**

FSAEI HE Sevastopol State University, Sevastopol  
Senior lecturer of chair «Higher Mathematics »  
Universitetskayast, 33, Sevastopol, Russian Federation, 299053  
Phone +79788150316  
E-mail: m.nikitin.1979@gmail.com

© А.В. Неменко, М.М. Никитин, 2024

**МАШИНОВЕДЕНИЕ И МЕХАТРОНИКА**

УДК 621.822

DOI: 10.33979/2073-7408-2024-364-2-38-51

А.Ю. КОРНЕЕВ, Е.В. МИЩЕНКО

**РАЗВИТИЕ ОРЛОВСКОЙ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ  
ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ СМАЗКИ**

**Аннотация.** В статье рассмотрены основные этапы развития Орловской научной школы гидродинамической теории смазки, современное состояние, перспективы. Данная школа внесла существенную лепту в развитие гидродинамической теории смазки в России. Отдельный параграф посвящен основателю гидродинамической теории смазки Николаю Павловичу Петрову.

**Ключевые слова:** гидродинамическая теория смазки, этапы развития, трибология, триботехника динамика, гидродинамический подшипник, гидростатический подшипник.

**Введение**

Развитие науки и техники показало, что надежные и долговечные машины, оборудование и приборы могут быть созданы только при удачном решении теоретических и прикладных задач трения, износа и смазки, так называемых задач трибологии и триботехники.

Трибология (от греческого *tribos* – трение и ...логия) – это наука, занимающаяся изучением трения и износа узлов машин и механизмов в присутствии смазочных материалов. В иностранной литературе встречается также термин «трибоника». Как научная дисциплина трибология сформировалась в начале 60-х годов нашего столетия и охватывает экспериментально-теоретические исследования физических (механических, электрических, магнитных, тепловых), химических, биологических и других явлений, связанных с трением.

Триботехника – это упорядоченные знания о практическом применении трибологии. Трению сопутствуют процессы трибологического изнашивания, и использование этих знаний на практике является важным разделом триботехники.

Таким образом, трибология является наукой о внешнем трении твердых и жидких тел, а триботехника – наукой о практическом применении трибологии при проектировании, изготовлении и эксплуатации трибологических систем. Трибологическая система – это комплекс элементов, включая связи, существующие между этими элементами и их свойствами.

Одной из основных задач трибологии является развитие методов прогнозирования износа узлов машин при заданных условиях трения и смазки. При этом стремятся к тому, чтобы узлы машин и механизмов рассчитывались на износостойкость с такой же уверенностью, как рассчитываются основные детали машин на прочность и деформацию.

Основным методом, снижающим износ взаимно перемещающихся поверхностей, является создание между этими поверхностями смазочных пленок, которые могут быть чрезвычайно разнообразными, начиная от окисных пленок, появляющихся на любой металлической поверхности при соприкосновении с окисляющей газовой средой, в том числе с воздухом, кончая искусственными жидкостями или газовыми пленками относительно большой толщины, полностью разделяющими трущиеся поверхности. Такие же защитные пленки образуются и при граничной смазке жидкими маслами, а также при твердых и пластичных смазках.

Смазочные пленки необходимой толщины между поверхностями трения могут быть созданы и рассчитаны с высокой степенью точности на базе гидродинамической и гидростатической систем смазок, в том числе негорючими и маловязкими жидкостями, водой, жидкими и парообразными хладагентами, газами и т.п. Это значит, что соответствующим выбором типа подшипника и смазки всегда можно обеспечить режим жидкостного трения

между движущимися поверхностями. Решение именно этих задач является основным объектом исследований гидродинамической теории смазки.

Учитывая, что износ является главной причиной потери работоспособности и снижения эффективности машин, вполне понятен интерес к проблемам трения. Появление первых технических устройств на заре современной цивилизации уже было связано с использованием узлов трения и необходимостью решения проблем смазки. Многие века имел место интуитивно-эмпирический подход, заключающийся в предварительном нанесении на поверхность трения смазочных материалов растительного или животного происхождения. Даже великие умы Античности и эпохи Возрождения не оставили значительных работ в этой области.

Особенностью развития трибологии и ее составной части гидродинамической теории смазки является то, что она стимулируется в основном потребностями техники. С появлением машинных агрегатов и двигательных установок, в которых значительно увеличились скорости и нагрузки, потребовались новые подходы и методы в решении трибологических проблем. Это так называемый доклассический период развития теории трения и смазки, основными достижениями которого были на теоретическом уровне появление законов А. Кулона; на эмпирическом – исследования Г. Хирна, Р. Тэрстона и многих других исследователей.

Научная работа сопровождает новую техническую разработку, которую необходимо подкрепить научными результатами. Поэтому главные достижения в трибологии появлялись в тех случаях, когда некоторые технологические разработки тормозились или требовали коренных улучшений. Этим объясняется также практически отсутствие границы между фундаментальными и прикладными исследованиями в данной области науки. Например, необходимость совершенствования смазки осей железнодорожных вагонов и развитие гидроэнергетики привели к созданию гидродинамической теории смазки (Б.Тауэр, Н.П.Петров, О. Рейнольдс и др.).

### **1. Основатель гидродинамической теории смазки Николай Павлович Петров**

Поистине, новая эра в развитии теоретических и прикладных вопросов в области трения и смазки начинается в период 1880 – 1930 гг., что связано с появлением нового класса энергетических и транспортных машин. Именно в это время, когда в России шло активное строительство железных дорог и создание новых отраслей промышленности, проявился талант русского ученого и инженера Н.П. Петрова, которого крупный немецкий ученый А. Зоммерфельд назвал «отцом гидродинамической теории смазки» [1].

Николай Павлович Петров родился 13 (25) мая 1836 г. в старинном городе Трубчевске Орловской губернии (в настоящее время территория Брянской области) в семье военного. Образование получил в Константиновском кадетском корпусе и Петербургской Инженерной академии. После окончания Академии в 1858 г. работал на кафедре математики под руководством известного ученого М.В. Остроградского, передавшего ученику высокую математическую культуру, глубину абстрактного мышления и превосходное владение аналитическим аппаратом при решении практических задач. Будучи вольнослушателем Технологического института Н.П. Петров принимал участие в проектировании машин на Охтинском заводе в коллективе талантливого конструктора профессора И.А. Вышнеградского.

В 1865 г. был направлен за границу для изучения прикладной механики. По возвращении читал лекции в Петербургском технологическом институте и Инженерной академии. После присвоения в 1867 г. звания адъюнкт-профессора практической механики Инженерной академии выполнял крупные научно-исследовательские работы по созданию оборудования военных заводов. Возглавлял кафедру паровой механики в Петербургском технологическом институте, а в 1871 г. кафедру железнодорожного дела. В это время начинается научная деятельность Н.П. Петрова в области трения, износа и смазки. В 1873 г. стал членом Инженерного совета Общества российских железных дорог, принимал участие в строительстве Транссибирской железной дороги. В 1892 был назначен председателем Инженерного совета Министерства путей сообщения, а в 1893 г. – заместителем министра

путей сообщения. В 1894 г. избирается почетным членом Петербургской академии наук. С 1896 по 1905 годы был председателем Русского технического общества.

В 1883 г. в «Инженерном журнале» издается первая работа Н.П. Петрова по гидродинамической теории смазки «Трение в машинах и влияние на него смазывающих масел», в 1886 г. была опубликована вторая работа «Описание и результаты опытов над трением жидкостей и машин»; а в 1887 г. третья книга – «Трение в машинах и влияние на него смазывающей жидкости. Практические результаты опытов». В 1900 г. в «Записках» Академии наук вышло в свет четвертое крупное сочинение Н.П. Петрова «Трение в машинах», в котором изложена теория смазки с учетом эксцентричного положения шипа в подшипнике.



*Рисунок 1 – Портрет Н.П. Петрова*

Н.П. Петров умер 15 января 1920 г. в г. Туапсе. За свою жизнь опубликовал более 80 научных работ и был удостоен многих премий. Ему была присуждена золотая медаль Русского технического общества, и он был избран почетным членом Московского политехнического общества.

## **2. Развитие Орловской научной школы гидродинамической теории смазки и создание проблемной научно-исследовательской лаборатории «Моделирование гидромеханических систем»**

Формирование научной школы гидродинамической теории смазки на Орловской земле начинается в 1993 г. с приездом из Харькова по приглашению руководства Орловского государственного технического университета (ОрелГТУ) Леонида Алексеевича Савина на кафедру «Прикладная механика». В 1998 г. защищает диссертационную работу на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.02.06 Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры в диссертационном совете ОрелГТУ на тему: «Теоретические основы расчета и динамика подшипников скольжения с парожидкостной смазкой».

Леонид Алексеевич Савин сформировал в ВУЗе отдельное самостоятельное направление: гидродинамическая теория смазки опор скольжения различного типа. Это направление было вызвано острыми потребностями роторной промышленности в более точных методах и методиках расчета подшипников скольжения, применяемых в, первую очередь, в высокоскоростных турбомашинах и турбоагрегатах, и начало развиваться в ОрелГТУ с конца 90-х гг. прошлого столетия.

Под руководством профессора Л.А. Савина и его учеников в период с 2000 г. по настоящее время были защищены более 30 кандидатских и докторских диссертаций по машиноведению и роторной динамике (таблицы 1 и 2). В рамках диссертационных исследований были разработаны и исследованы новые виды подшипниковых узлов и подвижных уплотнений, сформированы теоретические положения, математические, алгоритмические и программные модели гидродинамических процессов в сдвиговых и



напорных смазочных слоях с учетом влияния турбулентности, фазовых превращений, нестационарных течений, неізотермических и инерционных эффектов.

Таблица 1 - Защиты кандидатских диссертаций под руководством профессора Л.А. Савина



### Защиты кандидатских диссертаций

Кандидатские диссертации по подшипникам скольжения				
№ п/п	Название диссертации	ФИО диссертанта	Дата защиты	Специальность ВАК
1	Колебания и устойчивость роторов на подшипниках скольжения в условиях всплывания смазочного материала	Соломин Олег Вячеславович	22.06.2000	01.02.06
2	Влияние радиальных уплотнений на динамику роторов на подшипниках скольжения с криогенной смазкой	Устинов Дмитрий Евгеньевич	16.11.2001	01.02.06
3	Исследование динамики роторов на подшипниках скольжения методом мощностных графов связей	Жидков Сергей Анатольевич	15.05.2003	01.02.06
4	Динамические и интегральные характеристики конических подшипников скольжения в условия переменных свойств смазочного материала	Корнеев Андрей Юрьевич	27.02.2004	01.02.06
5	Динамика переходных режимов работы роторов на радиальных подшипниках скольжения	Пугачев Александр Олегович	14.05.2004	01.02.06
6	Повышение динамических качеств и ресурса опорных узлов роторов совмещением подшипников качения и скольжения	Поляков Роман Николаевич	26.05.2005	01.02.06
7	Несущая способность и динамические характеристики упорных подшипников жидкостного трения	Алехин Андрей Викторович	09.12.2005	01.02.06
8	Повышение долговечности аксиально-поршневых насосов строительных и дорожных машин на основе моделирования процессов в плунжерных парах	Масалов Руслан Владимирович	09.12.2005	05.05.04
9	Повышение несущей способности, ресурса и динамических характеристик упорных узлов роторов за счет совмещения подшипников качения и скольжения	Стручков Александр Александрович	13.12.2006	01.02.06
10	Влияние отклонений формы опорных поверхностей гидростатодинамических подшипников на динамические характеристики роторных систем	Данчин Игорь Анатольевич	29.05.2007	01.02.06
11	Динамический анализ роторных систем с опорами жидкостного трения на основе вейвлет-преобразования вибрационных сигналов	Широков Сергей Викторович	29.05.2007	01.02.06, 05.13.18
12	Несущая способность и динамические коэффициенты многослойных подшипников жидкостного трения	Панченко Алексей Иванович	26.06.2008	01.02.06
13	Решение комплексной задачи расчета характеристик радиальных лепестковых газодинамических подшипников	Сытин Антон Валерьевич	26.06.2008	01.02.06
14	Совершенствование динамических качеств подшипниковых узлов прокатных станов	Корнаев Алексей Валерьевич	17.10.2008	01.02.06
15	Обоснование параметров гидростатодинамических подшипников при смазке маловязкими нефтепродуктами	Анохин Александр Михайлович	28.01.2009	05.02.02
16	Моделирование и программа расчета подшипников жидкостного трения	Федоров Дмитрий Игоревич	28.04.2009	05.13.18
17	Параметрические колебания роторов на радиальных подшипниках жидкостного трения	Майоров Сергей Владимирович	05.02.2010	01.02.06
18	Влияние демпфирования и параметров осевых совмещенных опор на динамику роторов	Герасимов Сергей Анатольевич	29.06.2011	01.02.06
19	Математическое моделирование напорно-сдвиговых течений вязких жидкостей в каналах переменной геометрии	Корнаева Елена Петровна	18.11.2011	05.13.18
20	Динамические характеристики комбинированных опор с упругими элементами переключения роторных машин	Базлов Денис Олегович	21.05.2013	01.02.06
21	Динамические и интегральные характеристики упорных совмещенных подшипниковых узлов гидростатического типа	Спиридонов Максим Викторович	12.12.2013	01.02.06
22	Адаптивный подход к увеличению точности вычислительных моделей гидродинамических опор роторов	Кольцов Александр Юрьевич	21.01.2016	05.13.18
23	Совершенствование гидростатодинамических подшипников посредством регулирования параметров подачи смазочного материала	Шутин Денис Владимирович	27.01.2016	05.02.02
24	Математическое моделирование и численные методы расчета неізотермических течений вязких сред в конфузторных каналах с упругой поверхностью	Машков Евгений Александрович	16.05.2017	05.13.18
25	Обеспечение энергоэффективных режимов работы упорных гидростатодинамических подшипников с активным управлением	Бабин Александр Юрьевич	19.02.2020	05.02.02, 05.02.05
26	Грузоподъемность, жесткость и демпфирование комбинированной опоры с изменяемыми характеристиками	Бондаренко Максим Эдуардович	30.10.2020	05.02.02
27	Грузоподъемность и динамические характеристики магнитореологических подшипников жидкостного трения	Фетисов Александр Сергеевич	22.09.2022	2.5.2

Таблица 2 - Защиты докторских диссертаций под руководством профессора Л.А. Савина



### Защиты докторских диссертаций

Докторские диссертации по подшипникам скольжения				
№	Название диссертации	ФИО диссертанта	Дата защиты	Специальность ВАК
1	Разработка методов и инструментальных средств динамического анализа роторных систем с подшипниками жидкостного трения	Соломин Олег Вячеславович	28.12.2007	01.02.06
2	Основы теории и методология расчета комбинированных опор роторов	Поляков Роман Николаевич	20.12.2017	05.02.02
3	Моделирование течений сред сложной реологии в тонких каналах гидромеханических систем	Корнаев Алексей Валерьевич	06.12.2018	05.13.18
4	Методология расчета и динамический анализ конических подшипников жидкостного трения	Корнеев Андрей Юрьевич	21.04.2022	2.5.2

### Краткая информационная справка

Савин Леонид Алексеевич родился 24 июня 1959 г. в Брянской области. Доктор технических наук (1998 г.), профессор (2002 г.), Заслуженный деятель науки РФ (2019 г.), действительный член Российской инженерной академии, Почетный работник высшего профессионального образования (2004 г.), эксперт РИНКЦЭ, РАН, РНФ. Окончил с отличием Брянский машиностроительный техникум (1978 г.), Харьковский авиационный институт им. Н.Е. Жуковского (1984 г.), аспирантуру ХАИ (1988 г.) и докторантуру.



*Рисунок 2 – Фото профессора Л.А. Савина*

В 1989 г. Л.А. Савин защитил кандидатскую диссертацию по специальности 05.07.05 Тепловые двигатели летательных аппаратов в специализированном совете ХАИ на тему: «Влияние вскипания рабочих тел на динамику гидростатических опор турбонасосов ДЛА». В 1998 г. защитил докторскую диссертацию по специальности 01.02.06 Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры на тему «Теоретические основы и динамика подшипников скольжения с парожидкостной смазкой». Автор более 500 научных работ, в том числе 12 монографий, более 200 статей, 150 патентов и авторских свидетельств РФ. Принял участие в подготовке и работе более 100 научных конференций, руководил выполнением 45 научных проектов в рамках договоров с промышленными предприятиями, проектов Минобрнауки РФ, грантов РФФИ и РНФ, грантов Правительства КНР и ряда провинций Китая. Вице-президент научно-исследовательского института компании Шаунфей по производству подшипников скольжения.

История развития научной школы профессора Л.А. Савина начинается в конце девяностых годов, когда были подготовлены кандидатские диссертации соискателями О.В. Соломиным и Д.Е. Устиновым. Олег Вячеславович Соломин в 2000 г., а Дмитрий Евгеньевич Устинов в 2001 г. защитили кандидатские диссертации на темы: «Колебания и устойчивость роторов на подшипниках скольжения в условиях вскипания смазочного материала» и «Влияние радиальных уплотнений на динамику роторов на подшипниках скольжения с криогенной смазкой» соответственно.

Следующая группа научных исследователей в составе Сергея Анатольевича Жидкова, Андрея Юрьевича Корнеева, Александра Олеговича Пугачева и Романа Николаевича Полякова защитилась в период с 2003 по 2005 гг. Тематика их научных работ варьировалась от применения метода мощностных графов связей при исследовании динамики роторов на подшипниках скольжения (С.А. Жидков, 2003 г.), расчета динамических и интегральных характеристик конических подшипников скольжения в условиях переменных свойств смазочного материала (А.Ю. Корнеев, 2004 г.) до рассмотрения динамики переходных режимов работы роторов на радиальных подшипниках скольжения (А.О. Пугачев, 2004 г.) и исследования динамических качеств и ресурса опорных узлов роторов совмещением

подшипников качения и скольжения (Р.Н. Поляков, 2005 г.). Все вышеперечисленные ученые этого периода, кроме О.В. Жидкова, впоследствии стали докторами технических наук.

В этот период (конец 2005 г.) можно отметить еще две защиты кандидатских диссертаций А.В. Алехиным, рассмотревшим вопросы расчета характеристик упорных подшипников, и Р.В. Масаловым, исследовавшим вопрос повышения долговечности насосов строительных и дорожных машин.

Научная школа профессора Савина к этому времени набирает обороты. Одним из направлений деятельности научного коллектива стало регулярное проведение в ОрелГТУ международных, всероссийских и региональных научных мероприятий с участием ведущих ученых и молодых специалистов. В 2006 году коллектив единомышленников под руководством профессора Л.А. Савина на базе Орловского государственного технического университета задумывает и проводит Международный научный симпозиум «Гидродинамическая теория смазки – 120 лет», посвященного 170-летию со дня рождения Н.П. Петрова и 120-летию появления первых научных работ по гидродинамической теории смазки. Этот симпозиум вызвал огромный интерес в научном сообществе не только в России и странах СНГ, но и в Дальнем Зарубежье, в нем приняли участие более 100 ведущих ученых в данной области из России, Белоруссии, Германии, Индии, Италии, Литвы, Польши, Таиланда, Украины, Чехии и других стран. Были представлены доклады по фундаментальным проблемам и решению прикладных задач гидродинамической теории смазки [материалы МНС] по следующим направлениям:

- фундаментальные проблемы и прикладные задачи гидродинамической теории смазки;
- моделирование динамических процессов в опорных узлах роторных систем;
- трение и износ в машинах;
- технологическое обеспечение работоспособности элементов триботехнических систем;
- трибометрия и трибодиагностика.

Перед началом симпозиума совместная делегация коллективов двух ведущих ВУЗов России – Орловского государственного технического университета и Брянского государственного технического университета под руководством ректоров В.В. Голенкова и А.В. Лагерёва, профессора Л.А. Савина, ведущих ученых на родине Николая Павловича Петрова в городе Трубчевск (Брянская область) открыли 13 мая 2006 г. в день 170-летия со дня его рождения мемориальную доску, посвященную «Отцу гидродинамической теории смазки».



Рисунок 3 – Открытие мемориальной доски Н.П. Петрову



В работе научного симпозиума приняли участие ведущие иностранные ученые – Николо Бахшмид, Бруно Пицциджони, Паоло Пеннакки, Андреа Ванья, Эзео Танци (Миланский политехнический институт), Ярослав Запомель (Технический университет Остравы, Чехия) и Эдуард Маленовский (Технологический университет Брно, Чехия), Венката Рао и Анкуш Ананд (Университет Дели, Индия), Витаутас Барждайтис и Мариус Василиус (Каунасский технологический университет, Литва), Марионас Богдевициус (Вильнюсский технологический университет, Литва), Римантас Диджиокас (Университет Клайпеды, Литва), Тадеуш Шмильняк, Анджей Коржак, Грегорж Пекзкис (Силезский технологический университет, Польша), Адам Папьерски (Институт турбомашин, Лодзь, Польша), В.Н. Доценко (Национальный аэрокосмический университет имени Н.Е. Жуковского, «ХАИ», г. Харьков, Украина), В.А. Марцинковский (Сумский государственный университет, Украина), Мартин Декнер, Клаус Кванка, Петер Хельм (Технический университет Мюнхена, Германия).



*Рисунок 4 – Фото участников симпозиума*

Ректор Орловского государственного технического университета Вячеслав Александрович Голенков представил пленарный доклад об учебно-научно-производственном комплексе (УНПК) ОрелГТУ – институциональном центре инновационного развития региона. Идея заключалась в реализации концепции перехода на новую ступень интеграции образовательного процесса, научной и производственной деятельности на базе единой организационно-правовой и финансово-экономической модели функционирования вуза, в структуру которого вошли НИИ, конструкторские и технологические бюро, финансовые, промышленные фирмы и предприятия. Для своего времени это был в определенном роде прорыв, качественно новый скачок в функционировании такого сложного механизма, как Университет.

Ректор Брянского государственного технического университета Александр Лагереv поделился успешным опытом международного сотрудничества научных инженерных школ вузов как элемента единого образовательного пространства славянских государств в XXI веке на примере своего ВУЗа.

Свои доклады представили и выступили ведущие российские ученые в области гидродинамической теории смазки Л.А. Савин, В.А. Максимов (Казанский государственный технологический университет), А.И. Белоусов, Ю.И. Байбородов, С.В. Фалалеев (Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева), А.В. Киричек (Орловский государственный технический университет), Л.В. Горюнов (Казанский государственный технический университет имени А.Н. Туполева), М.Е. Подольский (Санкт-Петербургский государственный морской технический университет), В.Н. Колодежнов (Воронежская государственная технологическая академия), Ю.В. Рождественский, Е.А.

Задорожная (Южно-Уральский государственный университет), С.Ф. Яцун (Курский государственный технический университет).

Эта конференция дала мощный импульс продолжению развития научной школы профессора Савина, что отразилось в целом ряде защит диссертационных работ под его руководством. В конце 2006 г и в мае 2007 г. состоялись защиты трех кандидатских диссертаций. А.А. Стручков в декабре 2006 г. защищает диссертационную работу, связанную с расчетом статических и динамических характеристик и ресурса упорных узлов роторов за счет совмещения подшипников качения и скольжения. В мае 2007 г. ученики О.В. Соломина И.А. Данчин и С.В. Широков также успешно защищают работы, связанные с влиянием отклонений форм опорных поверхностей подшипников на динамические характеристики роторных систем и динамическом анализе роторных систем с опорами жидкостного трения на основе вейвлет-преобразования вибрационных сигналов.



Рисунок 5 – Коллектив ПНИЛ «Моделирование гидромеханических систем»

Завершением данного этапа развития школы стала первая под руководством профессора Савина защита диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук по научной специальности 01.02.06 Динамика и прочность машин, приборов и аппаратуры соискателем, будущим профессором, О.В. Соломиным в декабре 2007 г. Его научные изыскания на тему: «Разработка методов и инструментальных средств динамического анализа роторных систем с подшипниками жидкостного трения» подвели итог работы научной школы за 10-летний период. Забегая вперед, можно отметить, что следующую защиту докторской диссертации непосредственно под руководством Л.А. Савина по тематике опор высокоскоростных роторных систем пришлось ждать целых 10 лет...

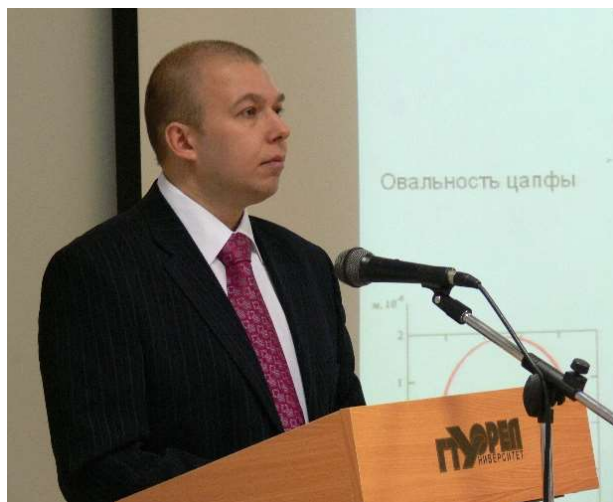


Рисунок 6 – Защита докторской диссертации О.В. Соломиным

Диссертационная работа О.В. Соломина посвящена изучению развития научно-технического направления, связанного с обеспечением работоспособности и повышением вибрационной надежности роторных машин с подшипниками жидкостного трения на основе разработки методов и инструментальных средств их динамического анализа для решения задач исследования, проектирования и оценки динамического состояния.

Диссертантом проведен анализ современных направлений совершенствования роторных машин транспортного и энергетического машиностроения, проанализированы и выявлены перспективные направления развития гидродинамической теории смазки, динамики и вибрационной диагностики роторных систем с подшипниками жидкостного трения, а также выполнен анализ конструкций и условий работы, моделей и методов, включая инструментальные средства динамического анализа роторных систем.

Построены эффективные математические модели расчета динамических характеристик роторных систем и подшипников жидкостного трения, разработаны алгоритмы и эффективные численные методы, на основе которых создано программное обеспечение для решения задач динамического анализа роторных систем с подшипниками жидкостного трения, проведены вычислительные эксперименты по выявлению закономерностей влияния различных факторов на динамическое поведение системы «ротор – подшипники жидкостного трения». Разработано и создано экспериментальное оборудование с современным информационно-измерительным комплексом для изучения динамических характеристик роторных систем с подшипниками жидкостного трения и оценки адекватности предложенных теоретических положений реальным процессам в системе «ротор – подшипники жидкостного трения» путем проведения сравнительного анализа данных расчетов с результатами опытных исследований, а также с данными, полученными другими авторами.

Разработаны методология и программное обеспечение для формирования эталонных вибрационных диагностических признаков различных динамических состояний роторной системы с подшипниками жидкостного трения на основе разработанных математических моделей и выработаны рекомендации по проектированию и оценке динамического состояния роторных систем на основе полученных результатов и применения разработанных инструментальных средств. Предложены оригинальные конструкторские решения, а также осуществлено внедрение результатов исследований в промышленное производство и учебный процесс.

С 2007 г. начинается сотрудничество школы профессора Савина с научными коллективами ученых из Китайской народной республики. После посещения профессором Л.А. Савиным Харбинского политехнического университета (ХПУ) в 2008 г. на полугодовую стажировку в ХПУ направляются молодые ученые Орловского и Курского государственных технических университетов доценты А.Ю. Корнеев и Е.В. Мищенко, которые провели теоретические и экспериментальные исследования по перспективным направлениям развития гидродинамической теории смазки.



*Рисунок 7 – Научная лаборатория Харбинского политехнического университета*



Эта стажировка дала мощный импульс продолжению научных контактов с китайскими коллегами. И уже в 2009-2010 гг. доцент А.Ю. Корнеев совместно с китайским коллегой Ли Шэнбо проводит ряд научных исследований на базе лаборатории Харбинского политехнического университета по расчету конических подшипников жидкостного трения, что в дальнейшем дает материал для защиты кандидатской диссертации Л.Шэнбо и в будущем докторской работы А.Ю. Корнеева. В это же время последовала научная стажировка и доцента Р.Н. Полякова.

Возвращаясь к научной школе отмечаем, что далее в 2008 г. последовали защиты кандидатских диссертаций А.И. Панченко, А.В. Сытина и переехавшего из Старого Оскола будущего доктора технических наук А.В. Корнаева. Их интересы охватывали вопросы расчета характеристик многослойных и лепестковых газодинамических подшипников, а также узлов прокатных станов.

В 2009-2010 гг. последовали еще три защиты по другим научным специальностям – А.М. Анохина (смазка подшипниками маловязкими нефтепродуктами), Д.И. Федорова (моделирование и программы расчета подшипников жидкостного трения) и С.В. Майорова (параметрические колебания роторов на радиальных подшипниках жидкостного трения).

Завершают этот научный период защиты С.А. Герасимова (2011 г.), Е.П. Корнаевой (2011 г.) и Д.О. Базлова (2013 г.). С. Герасимов исследовал влияние демпфирования осевых опор на динамику роторов, Е. Корнаева провела математическое моделирование напорно-сдвиговых течений вязких жидкостей в каналах переменной геометрии, а Д. Базлов – рассчитал динамические характеристики комбинированных опор с упругими элементами переключения роторных машин.

В мае 2016 г. был проведен второй международный научный симпозиум «Гидродинамическая теория смазки – XXI», посвященный 180-летию со дня рождения Н.П. Петрова. Работа симпозиума проводилась в следующих научных направлениях:

- фундаментальные и прикладные проблемы гидродинамической смазки;
- трение и износ в машинах;
- моделирование и технологии триботехнических систем;
- динамика и вибродиагностика роторных систем.



Рисунок 8 – Фото участников МНС 2016 г

Следующий виток развития научной школы профессора Л.А. Савина связан уже с защитами докторских диссертаций его учеников – Р.Н. Полякова, А.В. Корнаева, А.Ю. Корнеева и бывшего ученика Л. Савина А.О. Пугачева под руководством профессора Ю.А.

Равиковича. Однако, перед этим в 2016 г. состоялись защиты кандидатских диссертаций программиста А.Ю. Кольцова на тему: «Адаптивный подход к увеличению точности вычислительных моделей гидродинамических опор роторов» и Д.В. Шутина на тему: «Совершенствование гидростатодинамических подшипников посредством регулирования параметров подачи смазочного материала». В середине 2017 г. по математическому моделированию защитился Е.А. Машков.

В 2017 году состоялась защита докторской диссертации Р.Н. Полякова на тему «Основы теории и методология расчёта комбинированных опор роторов» по научной специальности 05.02.02 Машиноведение, системы приводов и детали машин, посвященная решению научной проблемы по созданию основ теории, методологии расчёта и инструментальных средств проектирования комбинированных опор роторов, а также в научном обосновании новых технических решений, имеющих важное значение для совершенствования опорных узлов роторных машин новых поколений.



*Рисунок 9 – Фото Р.Н. Полякова*

В работе решались такие важные задачи как разработка основ теории расчёта и математических моделей различных видов комбинированных опор, проведены вычислительные эксперименты и анализ возможностей улучшения рабочих характеристик опорных узлов роторов путём комбинирования подшипников качения и подшипников скольжения. Отдельным вопросом стояла разработка и создание экспериментальных установок с современным информационно-измерительным комплексом для изучения статических и динамических характеристик роторных систем с подшипниками скольжения. В рамках диссертационной работы проведены экспериментальные исследования по изучению динамических характеристик комбинированных опор, возможностей улучшения работоспособности и ресурса опорного узла, а также сравнительный анализ теоретических и экспериментальных исследований и обоснована адекватность разработанных математических моделей, в том числе и с результатами других авторов.

Разработана методология расчёта и инструментальные средства проектирования комбинированных опор с повышенными эксплуатационными характеристиками и выработаны рекомендации по проектированию роторных систем с комбинированными опорами на основе полученных результатов, предложены новые конструкции комбинированных опор, а также осуществлено внедрение результатов исследований в промышленное производство и в учебный процесс.

2018 год завершился защитой докторской диссертации ученика профессора Савина Алексея Валерьевича Корнаева. Тема его докторского исследования «Моделирование течений сред сложной реологии в тонких каналах гидромеханических систем», научная специальность 05.13.18 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Целью исследования являлась разработка теоретических положений, математических моделей и средств моделирования, формирующих методологическую и инструментальную базу для

улучшения энергетических и динамических характеристик течений сред в тонких каналах гидромеханических систем.

В работе был решен ряд задач:

- 1) обоснована возможность повышения энергоэффективности течений сред в тонких каналах гидромеханических систем путем совершенствования свойств текучих сред;
- 2) сформулированы концептуальные положения и общая математическая постановка задач о течении сред сложной реологии, в том числе дилатантных, псевдопластичных и пластичных, в тонких каналах с применением методов теории подобия и анализа размерностей;
- 3) теоретически обоснованы и сформулированы вариационные постановки задач о течении вязких несжимаемых сред сложной реологии для различных граничных условий;
- 4) разработаны эффективные алгоритмы, методы и методики численных решений задач о течении сред сложной реологии в тонких каналах на основе различных подходов;
- 5) разработан и протестирован комплекс программ реализации эффективных алгоритмов, методов и методик численных решений задач о течении сред сложной реологии с применением классического и вариационного подходов;
- 6) теоретически обоснован способ реологических испытаний сложных сред, вязкость которых зависит от сдвиговых скоростей деформаций, давления и температуры;
- 7) выполнен комплекс физических и вычислительных экспериментов для установления закономерностей и анализа возможностей повышения энергетических и динамических характеристик течений сред сложной реологии в тонких каналах гидромеханических систем.

В настоящее время грамотного специалиста пригласили работать в Иннополис.

В 2020 г. состоялись защиты кандидатских диссертаций учеников профессора Л.А. Савина и доцента Р.Н. Полякова А.Ю. Бабина и М.Э. Бондаренко соответственно. Темы их исследований связаны с обеспечением энергоэффективных режимов работы упорных гидростатодинамических подшипников с активным управлением и определением грузоподъемности, жёсткости и демпфирования комбинированной опоры с изменяемыми характеристиками.

В апреле 2022 г. по итогам обширного научного исследования за 15-летний период, включая этапы работы в Харбинском политехническом и Сямыньском технологическом университетах на базе диссертационного совета Орловского государственного университета имени И.С. Тургенева состоялась защита диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук по научной специальности 2.5.2 Машиноведение (технические науки) Андрея Юрьевича Корнеева на тему «Методология расчета и динамический анализ конических подшипников жидкостного трения», посвященная решению научно-технической проблемы снижения массогабаритных размеров роторно-опорных узлов на конических подшипниках жидкостного трения путем решения комплекса задач анализа и синтеза конических подшипников на основе разработки математических моделей расчета статических и динамических характеристик, инструментальных средств проектирования.

Автором разработана классификация конических подшипников жидкостного трения, основанная на комплексе новых технических решений подшипниковых узлов с различными видами питающих камер и дросселирования смазочного материала, сформированы теоретические основы расчета полей давлений в смазочном слое конических подшипников жидкостного трения в условиях переменных теплофизических свойств и турбулентного течения смазочного материала на основе совместного решения модифицированного уравнения Рейнольдса, уравнений баланса энергий и баланса расходов и уравнения взаимосвязи теплофизических свойств, а также разработаны математические модели и алгоритмы расчета несущей способности, расхода смазочного материала, потерь мощности на трение и прокачку конических подшипников и исследовать на основе разработанных программ расчета влияние эффекта турбулентности смазочного слоя на статические характеристики конических опор.



*Рисунок 10 – Защита диссертации А.Ю. Корнеева*

А.Ю. Корнеев разработал алгоритм построения кривых подвижного равновесия в конических подшипниках жидкостного трения, математическую модель расчета коэффициентов жесткости и демпфирования конических подшипников и исследовал на основе разработанных программ расчетные основные закономерности динамических характеристик от геометрических и рабочих параметров конических опор. Отдельным вопросом стояло решение задачи анализа радиальной и осевой устойчивости роторов на конических подшипниках путем решения уравнений движения и расчета коэффициентов жесткости и демпфирования, помимо этого проведено численное решение задачи построения пространственных траекторий движения центра ротора и разработано программное обеспечение для динамического анализа роторной системы на конических подшипниках жидкостного трения, выполнен комплекс вычислительных расчетов.

Теоретические разработки подтверждены комплексом экспериментальных исследований роторно-опорных узлов на конических подшипниках с целью сравнительного анализа результатов с теоретическими исследованиями, на основании которого разработаны непосредственно практические рекомендации по снижению повышенной вибрации в роторной системе. Разработана методология расчета конических подшипников жидкостного трения в виде методики проектирования, рекомендаций и программ расчета, позволяющих обеспечить выбор параметров подшипников, расчет статических и динамических характеристик, устойчивости роторной системы на конических опорах и предложены на основе полученных результатов новые технические решения конических подшипников жидкостного трения и рекомендации по проектированию конических подшипников в качестве опор роторов.

Завершающей на данный момент защитой кандидатской диссертации является работа ученика профессора Корнаева А.С. Фетисова (сентябрь 2022 г.) с вопросом расчета грузоподъемности и динамических характеристик магнитоэологических подшипников жидкостного трения.

В этот период идет плодотворная работа по сотрудничеству с китайскими коллегами из Сямыньского технологического университета, выигрываются научные гранты с обеих сторон, идет взаимодействие с ведущими предприятиями КНР.

Леонид Алексеевич Савин возглавлял кафедру механики, мехатроники и робототехники ОГУ имени И.С. Тургенева до 2018 г., после чего передал бразды правления кафедрой своему ученику Р.Н. Полякову. Школа профессора Савин внесла существенный вклад в разработку теоретических основ и методологии расчета подшипников жидкостного

трения различных типов и размеров, их статических и динамических характеристик, динамического анализа роторов, что позволило с высокой степенью точности решать поставленные задачи и давать рекомендации по применению вышеобозначенных опор в высокоскоростных роторных системах. По заказам промышленных предприятий РФ был выполнен ряд научно-исследовательских работ и проектов на базе лаборатории «Моделирование гидромеханических систем» ОГУ имени И.С. Тургенева.

Авторы надеются, что тот импульс, который был задан доктором технических наук, профессором, Заслуженным деятелем науки РФ Леонидом Алексеевичем Савиным подхватят и дальше разовьют в своих научных работах его ученики.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидродинамическая теория смазки – 120 лет: Труды Международного научного симпозиума. В 2-х томах. - М.: Машиностроение-1, Орел: ОрелГТУ, 2006. - 658 с.
2. Гидродинамическая теория смазки – XXI. Сборник тезисов международного научного симпозиума - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева, 2016. - 98 с.

---

**Корнеев Андрей Юрьевич**

ФГБОУ ВО «Орловский государственный  
университет имени И.С. Тургенева»  
302030, г. Орел, ул. Московская, 34  
Декан факультета среднего профессионального  
образования,  
Доктор технических наук, доцент  
Тел. 8-906-662-44-22  
E-mail: korneev\_andrey@mail.ru

**Мищенко Елена Владимировна**

ФГБОУ ВО «Орловский государственный  
аграрный университет имени Н.В. Парахина»  
302019, г. Орел, ул. Генерала Родина, 69  
Кандидат технических наук, доцент кафедры  
техносферной безопасности  
Тел. 8-953-623-22-45  
E-mail: art\_lena@inbox.ru

---

A.YU. KORNEEV, E.V. MISHCHENKO

### THE DEVELOPMENT OF THE ORYOL SCIENTIFIC SCHOOL OF THE HYDRODYNAMIC LUBRICATION THEORY

**Abstract.** *The article considers the main stages of the development of the Orel scientific school of hydrodynamic lubrication theory, the current state, and prospects. This school has made a significant contribution to the development of the hydrodynamic lubrication theory in Russia. A separate paragraph is devoted to the founder of the hydrodynamic lubrication theory Nikolai Pavlovich Petrov.*

**Keywords:** *hydrodynamic lubrication theory, stages of development, tribology, tribotechnics dynamics, hydrodynamic bearing, hydrostatic bearing.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Gidrodinamicheskaya teoriya smazki – 120 let: Trudy Mezhdunarodnogo nauchnogo simpoziuma. V 2-kh tomakh. - M.: Mashinostroyeniye-1, Orel: OrelGTU, 2006. - 658 s.
2. Gidrodinamicheskaya teoriya smazki – XXI. Sbornik tezisov mezhdunarodnogo nauchnogo simpoziuma - Orel: OGU imeni I.S. Turgeneva, 2016. - 98 s.

---

**Korneev Andrey Yurievich**

Orel State University named after I.S. Turgenev,  
302030, Orel, Moskovskaya street, 34  
Dean of faculty of mean professional education  
Doctor of technical sciences, assistant professor  
Tel. 8-906-662-44-22  
E-mail: korneev\_andrey@mail.ru

**Mishchenko Elena Vladimirovna**

Orel State Agrarian University named after N.V.  
Parakhin,  
302019, Orel, Generala Rodina street, 69  
Candidate of technical sciences, assistant professor  
of department of technosphere safety  
Tel. 8-953-623-22-45  
E-mail: art\_lena@inbox.ru

© А.Ю. Корнеев, Е.В. Мищенко, 2024



В.И. ЧЕРНЫШЕВ, О.В. ФОМИНОВА

## СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ: ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ УПРАВЛЯЕМОСТИ

**Аннотация.** *Управляемость рассматривается как одно из фундаментальных свойств систем управления, которое не зависит от начальных условий и внешних возмущений. Для аддитивных моделей систем управления установление факта управляемости любой из её подсистем с соответствующим скалярным управлением означает, что она управляема в целом, поскольку остальные компоненты вектора управления можно принять равными нулю.*

*Установлено, что если исследуемую систему со скалярным управлением представить в виде первой канонической формы, то она является вполне управляемой. Причем все дополнительные системы, полученные в результате замены переменных состояния, также являются вполне управляемыми. Информация об управляемости данных систем содержится в общем базисе их передаточных функций в виде полной группы базовых функций.*

*Показано, что управляемость системы можно установить также в результате использования собственных векторов матрицы состояния для преобразования последней к диагональному виду, а также матрицы входа. При этом управляемость системы обусловлена отсутствием в матрице входа строк с нулевыми элементами при условии линейной независимости переменных состояния.*

*Кроме доказательства альтернативных критериев управляемости приведено также доказательство управляемости систем при использовании блочной матрицы управляемости Калмана в авторской редакции.*

*Приведены примеры и программы решения задач связанных с анализом различных аспектов обеспечения управляемости систем управления.*

**Ключевые слова:** *система управления, управляемость, критерий управляемости, системные матрицы, матрица собственных векторов, передаточная функция.*

### Введение.

В теории управления особое внимание уделяется проблеме управляемости динамических систем, связанной с обеспечением требуемых переводов системы в фазовом пространстве переменных состояния под воздействием формируемого управления [1-4]. Основные понятия и критерий управляемости были сформулированы в результате исследования линейных стационарных систем известным ученым в области теории управления Калманом [5,6].

В последние годы наблюдается быстрый рост публикаций, посвященных исследованию управляемости динамических систем, подсистемы которых описываются существенно нелинейными уравнениями в том числе с дискретно перенастраиваемыми и непрерывно изменяющимися параметрами системных матриц [7-11]. Возможности этих систем с позиций достижения целей управления по показателям быстродействия, точности и помехоустойчивости качественно превосходят возможности соответствующих аналогов в классе линейных систем управления. Причем рамках данного научного направления создание обобщающих базовых элементов теории управляемости еще не завершено. По крайней мере, возникает множество сопутствующих задач в области динамического и функционального анализа, которые требуют использования различных математических методов и разработки альтернативных критериев управляемости [12-14].

В данной статье дано обоснование целесообразности использования альтернативных критериев управляемости, а также приведены примеры и программы решения задач, связанных с анализом различных аспектов обеспечения управляемости.

### Основная часть.

Исследование системы управления на управляемость является одним из важных шагов в синтезе этих систем, а также предшествует решению задач оптимального управления.

Далее рассматриваются линейные системы управления, динамика которых описывается уравнениями состояния и выхода:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \quad x(0) = x_0, \quad (1)$$

$$y(t) = Cx(t), \quad (2)$$

где  $x(t)$  –  $n$ -мерный вектор состояния;  
 $u(t)$  –  $r$ -мерный вектор управления;  
 $y(t)$  –  $k$ -мерный вектор выхода;  
 $A, B, C$  – матрицы состояния, входа и выхода размерности  $(n \times n), (n \times r), (k \times n)$  соответственно;  
 $x_0$  – начальное состояние.

Под *управляемостью* системы, описываемой матрицами  $(A, B)$ , будем понимать существование вектора кусочно-постоянного управления  $u(t)$ , при котором система переводится за конечное время  $T$  из произвольного начального состояния  $x(0)$  в произвольно заданное конечное состояние  $x(T)$ , где  $x(0)$  и  $x(T)$  – две точки пространства состояний размерности  $n$ .

Из приведенного определения следует исходный критерий управляемости: все точки пространства состояния должны быть доступны для перевода в них системы, описываемой уравнением состояния. Если система (1) отвечает данному исходному критерию управляемости, то она является полностью управляемой.

Следует предположить, что в общем случае указанное выше свойство управляемых систем, связанное с их перемещением в пространстве состояния, осуществимо только при неограниченном кусочно-постоянном управлении, то есть, когда возможно имитировать разрывы второго рода. Это, в определенной степени, касается и одномерных систем с неограниченным скалярным управлением – они являются полностью управляемыми, но при дополнительном условии – переменные состояния должны быть линейно независимыми функциями. Действительно, если обнаружены линейно зависимые переменные состояния, то точки, лежащие между ними, будут недоступны для перевода и, как следствие, систему следует признать не вполне управляемой. Однако если одномерная система функционирует при ограниченном скалярном управлении и удовлетворяет исходному критерию управляемости в ограниченной области переменных состояния, то такую систему следует характеризовать как вполне управляемую.

Аналогично данные понятия управляемости распространяются и на систему в целом и связаны с формированием вектора выхода  $y(t)$ .

В развитии сказанного приведем следующие соображения.

1. Управляемость следует рассматривать как одно из фундаментальных свойств систем управления, которое не зависит от начальных условий и внешних возмущений. Если установлено, что система является управляемой при  $x(0) = 0$ , то она будет управляема и при других  $x(0) \neq 0$ . По этой причине для установления управляемости достаточно ориентироваться на анализ вынужденных процессов при нулевых начальных условиях  $x(0) = 0$ , то есть используя для этих целей передаточные функции.

2. Система (1) является аддитивной моделью и рассматривается как совокупность подсистем с соответствующим скалярным управлением. На основании этого можно утверждать, что из установления факта управляемости любой из ее подсистем следует, что она управляема в целом, поскольку остальные компоненты вектора управления можно принять равными нулю.

3. Если исследуемая система со скалярным управлением представлена в виде первой канонической формы, то она является вполне управляемой. Данное утверждение следует из того, что уравнение состояния обращается в тождество именно линейно независимыми переменными состояниями.

В подтверждение вышесказанного на рисунке 1 представлена программа, демонстрирующая нахождение передаточных функций для первых канонических форм систем управления, которые имеют характерные матрицы  $A$  и  $B$ . Как видно, компоненты передаточных функций линейно независимы. Из установления этого факта следует, что соответствующие переменные состояния как функции времени будут обладать тем же свойством.

$$\begin{aligned}
 A2(a) &:= \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -a_0 & -a_1 \end{pmatrix} & B2 &:= \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} & E2 &:= \text{identity}(2) \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 W2(s, a) &:= (E2 \cdot s - A2(a))^{-1} \cdot B2 \rightarrow \begin{pmatrix} \frac{1}{s^2 + a_1 \cdot s + a_0} \\ \frac{s}{s^2 + a_1 \cdot s + a_0} \end{pmatrix} \\
 A3(a) &:= \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 \end{pmatrix} & B3 &:= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} & E3 &:= \text{identity}(3) \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 W3(s, a) &:= (E3 \cdot s - A3(a))^{-1} \cdot B3 \rightarrow \begin{pmatrix} \frac{1}{s^3 + a_2 \cdot s^2 + a_1 \cdot s + a_0} \\ \frac{s}{s^3 + a_2 \cdot s^2 + a_1 \cdot s + a_0} \\ \frac{s^2}{s^3 + a_2 \cdot s^2 + a_1 \cdot s + a_0} \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Рисунок 1 - Mathcad-документ

4. Если исследуемая система со скалярным управлением является вполне управляемой, то все дополнительные системы, получаемые в результате замены переменных состояния  $x$  на  $z$  по схеме  $x = H \cdot z$ ,  $X(s) = H \cdot Z(s) \leftrightarrow Wx(s) = H \cdot Wz(s)$ , где  $H$  – матрица замещения размерности  $(n \times n)$ , определитель которой не равен нулю, будут также являться вполне управляемыми. Данные преобразования позволяют получить однотипные системы управления, информация об управляемости которых содержится в общем базисе их переменных состояния или их передаточных функциях. Элементами такого базиса могут быть только линейно независимые базисные функции:

$$q(t) = [q_1(t) \quad q_2(t) \quad \dots \quad q_n(t)]^T \leftrightarrow Q(s) = [Q_1(s) \quad Q_2(s) \quad \dots \quad Q_n(s)]^T. \quad (3)$$

Если базисные функции двух однотипных систем управления установлены, то можно записать следующие соотношения:

$$Wx(s) = Mx \cdot [Q_1(s) \quad Q_2(s) \quad \dots \quad Q_n(s)]^T, \quad (4)$$

$$Wz(s) = Mz \cdot [Q_1(s) \quad Q_2(s) \quad \dots \quad Q_n(s)]^T, \quad (5)$$

где  $Mx$ ,  $Mz$  – невырожденные матрицы размерности  $(n \times n)$ .

Отсюда находим, что матрица замещения

$$H = Mx \cdot Mz^{-1}, \quad (6)$$

и, соответственно,

$$Wx(s) = H \cdot Wz(s), \quad (7)$$

$$Wz(s) = H^{-1} \cdot Wx(s). \quad (8)$$

На рисунке 2 и 3 приведены примеры нахождения базисных функций для однотипных систем управления, а также осуществлена проверка выполнения соотношений (6) – (8). Как видно, базисные функции, как изображения по Лапласу  $Q(s) = L^{-1}[q(t)]$ , представляются в виде рациональных дробей.

$$\begin{aligned}
 A1 &:= \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 2 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \end{pmatrix} & B1 &:= \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix} & E &:= \text{identity}(3) \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & \lambda &:= \text{eigenvals}(A1) = \begin{pmatrix} 2 \\ 0.5 + 0.866i \\ 0.5 - 0.866i \end{pmatrix} \\
 Wx(s) &:= (E \cdot s - A1)^{-1} \cdot B1 \left| \begin{array}{l} \text{simplify} \\ \text{parfrac} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} \frac{1}{s-2} - \frac{s}{s^2-s+1} \\ \frac{1}{s^2-s+1} + \frac{1}{s-2} \\ \frac{3 \cdot s - 1}{s^2-s+1} - \frac{1}{s-2} \end{pmatrix} & Hd &:= \begin{pmatrix} 2 & 6 & 1 \\ 2 & 1 & 0 \\ -1 & 4 & 2 \end{pmatrix} & \text{rank}(Hd) &= 3 \\
 Wz(s) &:= Hd^{-1} \cdot Wx(s) \left| \begin{array}{l} \text{simplify} \\ \text{parfrac} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} \frac{5}{11 \cdot (s-2)} + \frac{5 \cdot s + 7}{11 \cdot (s^2-s+1)} \\ \frac{1}{11 \cdot (s-2)} - \frac{10 \cdot s + 3}{11 \cdot (s^2-s+1)} \\ \frac{39 \cdot s + 4}{11 \cdot (s^2-s+1)} - \frac{5}{11 \cdot (s-2)} \end{pmatrix} & Q(s) &:= \begin{pmatrix} \frac{1}{s-2} \\ \frac{1}{s^2-s+1} \\ \frac{s}{s^2-s+1} \end{pmatrix} \\
 Mx &:= \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 0 \\ -1 & -1 & 3 \end{pmatrix} & Mz &:= \frac{1}{11} \cdot \begin{pmatrix} 5 & 7 & 5 \\ 1 & -3 & -10 \\ -5 & 4 & 39 \end{pmatrix} & Mx \cdot Mz^{-1} &\rightarrow \begin{pmatrix} 2 & 6 & 1 \\ 2 & 1 & 0 \\ -1 & 4 & 2 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Рисунок 2 - Mathcad-документ

$$\begin{aligned}
 A1 &:= \begin{pmatrix} 2 & -4 & 0 \\ 1 & -4 & 0 \\ 1 & -2 & -2 \end{pmatrix} & B1 &:= \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix} & E &:= \text{identity}(3) \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & \lambda &:= \text{eigenvals}(A1) = \begin{pmatrix} -2 \\ -2 \\ 1 \end{pmatrix} \\
 Wx(s) &:= (E \cdot s - A1)^{-1} \cdot B1 \left| \begin{array}{l} \text{simplify} \\ \text{parfrac} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} \frac{s+4}{s^2+2 \cdot s-4} \\ \frac{1}{s^2+2 \cdot s-4} \\ \frac{1}{s^2+2 \cdot s-4} + \frac{2}{s+2} \end{pmatrix} & Hd &:= \begin{pmatrix} 2 & 6 & 1 \\ 2 & 1 & 0 \\ -1 & 4 & 2 \end{pmatrix} & \text{rank}(Hd) &= 3 \\
 Wz(s) &:= Hd^{-1} \cdot Wx(s) \left| \begin{array}{l} \text{simplify} \\ \text{parfrac} \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} \frac{2}{11 \cdot (s+2)} - \frac{2 \cdot s - 1}{11 \cdot (s^2+2 \cdot s-4)} \\ \frac{4 \cdot s + 9}{11 \cdot (s^2+2 \cdot s-4)} - \frac{4}{11 \cdot (s+2)} \\ \frac{20}{11 \cdot (s+2)} - \frac{9 \cdot s + 12}{11 \cdot (s^2+2 \cdot s-4)} \end{pmatrix} & Q(s) &:= \begin{pmatrix} \frac{1}{s+2} \\ \frac{1}{s^2+2 \cdot s} \\ \frac{s}{s^2+2 \cdot s} \end{pmatrix} \\
 Mx &:= \begin{pmatrix} 0 & 4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} & Mz &:= \frac{1}{11} \cdot \begin{pmatrix} 2 & 1 & -2 \\ -4 & 9 & 4 \end{pmatrix} & Mx \cdot Mz^{-1} &\rightarrow \begin{pmatrix} 2 & 6 & 1 \\ 2 & 1 & 0 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Рисунок 3 - Mathcad-документ

Рассмотрим теперь случай, когда система управления представлена в виде первой канонической формы, то есть с матрицами стандартного вида

$$Az = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ & & \vdots & & \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -a_0 & -a_1 & -a_1 & \dots & -a_{n-1} \end{pmatrix}, \quad Bz = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

и передаточной функцией

$$Wz(s) = (Es - Az)^{-1}Bz = \begin{pmatrix} \frac{1}{s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + a_0} \\ \frac{s}{s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + a_0} \\ \dots \\ \frac{s^{n-1}}{s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + a_0} \end{pmatrix}. \quad (10)$$

где  $E$  – единичная матрица.

Компоненты передаточной функции данного типа – это базисные функции  $Q(s) = Wz(s)$ . Кроме того, в качестве базисных функций можно принимать также отдельные группы из  $n$  простых дробей, которые находятся в результате разложения компонент передаточной функции как дробно-рациональных функций.

Примеры формирования отдельных групп базисных функций, которые являются элементами общего базиса передаточных функций для соответствующих однотипных систем управления, представлены на рисунке 4.

Следует отметить, что общий знаменатель базисных функций – это многочлен  $n$ -ой степени.

Таким образом, информация о наличии  $n$  базисных функций в передаточной функции исследуемой системы позволяет установить её управляемость и, соответственно, сформулировать первый альтернативный критерий управляемости: если в передаточной функции исследуемой системы можно выделить группу из  $n$  базовых функций, то исследуемая система является вполне управляемой.

Ниже приведены примеры анализа систем, заданных матрицами  $A$  и  $B$ , на соответствие первому альтернативному критерию управляемости.

**Пример 1.** Исследовать управляемость системы с матрицами состояния и входа

$$A = \begin{pmatrix} -3 & 5 \\ 2 & 0 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}.$$

Из передаточной функции

$$W(s) = (Es - A)^{-1}B = \frac{1}{7} \begin{pmatrix} \frac{12}{s-2} - \frac{5}{s+5} \\ \frac{12}{s-2} + \frac{2}{s+5} \end{pmatrix}$$

можно выделить две базисные функции  $Q_1(s) = \frac{1}{s-2}$  и  $Q_2(s) = \frac{1}{s+5}$  – следовательно исследуемая система является вполне управляемой.

**Пример 2.** Исследовать управляемость системы с матрицами состояния и входа

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -2 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}.$$

Из передаточной функции

$$W(s) = (Es - A)^{-1}B = \frac{1}{7} \begin{pmatrix} \frac{1}{s+1} \\ -1 \\ \frac{1}{s+1} \end{pmatrix}$$

можно выделить только одну базисную функцию  $Q_1(s) = \frac{1}{s+1}$ . Следовательно исследуемая система не является вполне управляемой.

$$\begin{aligned}
 Wx1(s) &:= \begin{bmatrix} \frac{1}{(s-1) \cdot (s+2) \cdot (s+3)} \\ \frac{s}{(s-1) \cdot (s+2) \cdot (s+3)} \\ \frac{s^2}{(s-1) \cdot (s+2) \cdot (s+3)} \end{bmatrix} \quad (s-1) \cdot (s+2) \cdot (s+3) \text{ expand} \rightarrow s^3 + 4 \cdot s^2 + s - 6 \\
 Q1(s) &:= \begin{bmatrix} \frac{1}{s^3 + 4 \cdot s^2 + s - 6} \\ \frac{s}{s^3 + 4 \cdot s^2 + s - 6} \\ \frac{s^2}{s^3 + 4 \cdot s^2 + s - 6} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \frac{1}{s-1} \\ \frac{1}{s+2} \\ \frac{1}{s+3} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \frac{1}{(s-1) \cdot (s+2)} \\ \frac{s}{(s-1) \cdot (s+2)} \\ \frac{1}{s+3} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \frac{1}{(s+2) \cdot (s+3)} \\ \frac{1}{s+2} \\ \frac{s}{(s+2) \cdot (s+3)} \end{bmatrix} \\
 Wx2(s) &:= \begin{bmatrix} \frac{1}{(s^2 - s + 2) \cdot (s+3)} \\ \frac{s}{(s^2 - s + 2) \cdot (s+3)} \\ \frac{s^2}{(s^2 - s + 2) \cdot (s+3)} \end{bmatrix} \quad s^2 - s + 2 \text{ solve} \rightarrow \begin{bmatrix} \frac{1}{2} - \left(\frac{\sqrt{7}}{2}\right) \cdot i \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \sqrt{7} \cdot i \end{bmatrix} \\
 Q2(s) &:= \begin{bmatrix} \frac{1}{s^3 + 2 \cdot s^2 - s + 6} \\ \frac{s}{s^3 + 2 \cdot s^2 - s + 6} \\ \frac{s^2}{s^3 + 2 \cdot s^2 - s + 6} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \frac{1}{s^2 - s + 2} \\ \frac{s}{s^2 - s + 2} \\ \frac{1}{s+3} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \frac{1}{s^2 - s + 2} \\ \frac{1}{s+3} \\ \frac{s}{s^2 - s + 2} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \frac{1}{s+3} \\ \frac{1}{s^2 - s + 2} \\ \frac{s}{s^2 - s + 2} \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Рисунок 4 - Mathcad-документ

**Пример 3.** Исследовать управляемость системы с матрицами состояния и входа:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 5 & 0 & 2 \\ -2 & 0 & -2 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix}.$$

Из передаточной функции

$$W(s) = (Es - A)^{-1}B = \frac{1}{5} \begin{pmatrix} \frac{2}{s-2} - \frac{3}{s+3} \\ \frac{9}{s+3} - \frac{4}{s-2} \\ \frac{1}{s-2} - \frac{6}{s+3} \end{pmatrix}.$$

можно выделить только две базисные функции  $Q_1(s) = \frac{1}{s-2}$  и  $Q_2(s) = \frac{1}{s+3}$ . Следовательно исследуемая система не является вполне управляемой.

**Пример 4.** Исследовать управляемость системы с матрицами состояния и входа:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 4 \\ 0 & 2 & 2 \\ 0 & 1 & 2 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix}.$$

Из передаточной функции

$$W(s) = (Es - A)^{-1}B = \frac{1}{5} \begin{pmatrix} \frac{4s - 4}{s^2 - 4s + 2} - \frac{3}{s - 1} \\ 4 \\ \frac{s^2 - 4s + 2}{2s - 4} \\ \frac{s^2 - 4s + 2}{s^2 - 4s + 2} \end{pmatrix}.$$

можно выделить три базисные функции  $Q_1(s) = \frac{3}{s-1}$ ,  $Q_2(s) = \frac{1}{s^2-4s+2}$  и  $Q_3(s) = \frac{s}{s^2-4s+2}$ . Следовательно исследуемая система является вполне управляемой.

Опосредованно установить управляемость системы можно также в результате замене переменных ( $x$  на  $z$ ) и получения новых матриц ( $A \rightarrow Az$  и  $B \rightarrow Bz$ ). Необходимая искомая информация об управляемости исходной системы становится доступной если новая матрица состояния  $Az$  является диагональной, а все строки новой матрицы выхода  $Bz$  отличны от нуля.

Из теории матриц известно, что каждой квадратной матрице  $A$  можно поставить в соответствие квадратную матрицу  $S$ , содержащую собственные векторы матрицы  $A$ . Если определитель данной матрицы не равен нулю, то в результате следующего преобразования

$$Az = S^{-1}AS \quad (11)$$

получаем новую матрицу  $Az$ , которая уже будет диагональной.

Теперь, чтобы установить является ли система вполне управляемой, ориентируясь на вышеозначенные свойства квадратных матриц, необходимо выполнить следующие действия.

1. Определить преобразующую матрицу  $S$  и убедиться, что данная матрица невырожденная, то есть её определитель не равен нулю.

2. Произвести замену переменных в уравнении состояния (1), используя подстановку

$$x = Sz, \quad (12)$$

и перейти к уравнению

$$\dot{z} = Az \cdot z + Bz \cdot u. \quad (13)$$

Здесь новая матрица состояния  $Az$  определяется из формулы (11), а новая матрица входа:

$$Bz = S^{-1}B. \quad (14)$$

3. Установить являются ли все строки матрицы входа  $Bz$  отличными от нуля? Если данное условие выполняется, то исследуемая система является вполне управляемой.

Этот вывод следует из того, что матрица  $Az$  является диагональной, то есть взаимодействия между переменными состояния  $z$  не проявляются и их зависимость от управления  $u$  обусловлена отсутствием в матрице  $Bz$  строк с нулевыми элементами. При наличии же соотношения (12) соответствующий вывод об управляемости системы (13) справедлив и для исходной системы.

Сформулируем второй альтернативный критерий управляемости: если преобразующая матрица  $S$  является невырожденной, что гарантирует преобразование матрицы состояния к диагональному виду  $Az = S^{-1}A \cdot S$ , то управляемость исходной системы обусловлена отсутствием в матрице входа  $Bz = S^{-1}B$  строк с нулевыми элементами при условии линейной независимости переменных состояния.

Покажем, как можно определять матрицу  $S$  и получать информацию об управляемости системы в среде Mathcad. Примеры приведены на рисунке 5. В этих примерах наряду со встроенной функцией  $\text{eigenvecs}(A)$ , которая позволяет определить матрицу  $S$ , использовалась также встроенная функция  $\text{eigenvals}(A)$ , которая создает вектор собственных значений матрицы  $A$ .

Во всех рассмотренных примерах управляемость систем подтверждена – они являются вполне управляемыми.

На рисунке 6 схематично отображены информационные структуры и их элементы, используемые при анализе управляемости. Поскольку информационные структуры первого (а) и второго (б) альтернативных критериев управляемости опосредствовано зависят от системных матриц  $A$  и  $B$ , то логично предположить, что должен существовать и критерий управляемости (в), информационные элементы которого непосредственно зависят от



системных матриц. Исходя из того, что в последнем случае  $n$  информационных элементов могут быть получены только в результате бинарных комбинаций двух матриц и должны быть однотипными, то возможен только единственный вариант их представления:  $B, AB, A^2B, \dots, A^{n-1}B$ .

Как было доказано Калманом для оценки управляемости системы можно использовать блочную матрицу управляемости:

$$P = (B \ AB \ A^2B \ \dots \ A^{n-1}B). \quad (15)$$

В случае скалярного управления эта матрица является квадратной размерности  $(n \times n)$ . Утверждается, что если её ранг равен  $n$ , то система является вполне управляемой.

Заметим, что если ранг матрицы  $P$  меньше  $n$ , то её определитель будет равен нулю, а это значит, что матрица имеет равные или пропорциональные столбцы.

$$\begin{aligned} A1 &:= \begin{pmatrix} 2 & -4 & 0 \\ 1 & -4 & 0 \\ 1 & -2 & -2 \end{pmatrix} & |A1| &= 8 & B1 &:= \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix} & \text{eigenvals}(A1) &= \begin{pmatrix} -2 \\ -3.236 \\ 1.236 \end{pmatrix} \\ S1 &:= \text{eigenvecs}(A1) = \begin{pmatrix} 0 & -0.475 & -0.965 \\ 0 & -0.622 & -0.184 \\ 1 & -0.622 & -0.184 \end{pmatrix} & |S1| &= -0.513 \\ S1^{-1} \cdot A1 \cdot S1 &= \begin{pmatrix} -2 & 0 & 0 \\ 0 & -3.236 & -1.11 \times 10^{-15} \\ 0 & 0 & 1.236 \end{pmatrix} & S1^{-1} \cdot B1 &= \begin{pmatrix} 2 \\ 0.359 \\ -1.213 \end{pmatrix} \\ A2 &:= \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -2 & -3 & -5 \end{pmatrix} & |A2| &= -2 & B2 &:= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} & \text{eigenvals}(A2) &= \begin{pmatrix} -4.424 \\ -0.288 + 0.608i \\ -0.288 - 0.608i \end{pmatrix} \\ S2 &:= \text{eigenvecs}(A2) = \begin{pmatrix} 0.05 & -0.777 & -0.777 \\ -0.22 & 0.224 - 0.472i & 0.224 + 0.472i \\ 0.974 & 0.222 + 0.272i & 0.222 - 0.272i \end{pmatrix} & |S2| &= -0.638i \\ S2^{-1} \cdot A2 \cdot S2 &= \begin{pmatrix} -4.424 & 0 & 0 \\ 0 & -0.288 + 0.608i & 0 \\ 0 & 0 & -0.288 - 0.608i \end{pmatrix} & S2^{-1} \cdot B2 &= \begin{pmatrix} 1.15 \\ 0.037 + 0.251i \\ 0.037 - 0.251i \end{pmatrix} \\ A3 &:= \begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 3 \end{pmatrix} & |A3| &= 12 & B3 &:= \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} & \text{eigenvals}(A3) &= \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} \\ S3 &:= \text{eigenvecs}(A3) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -0.707 \\ 0 & 0 & 0.707 \end{pmatrix} & |S3| &= 0.707 \\ S3^{-1} \cdot A3 \cdot S3 &= \begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{pmatrix} & S3^{-1} \cdot B3 &= \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \\ 1.414 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Рисунок 5 - Mathcad-документ

Ниже приводится авторский вариант доказательства данного критерия управляемости.



Доказательство.

Пусть  $n = 3, r = 1$ .

Запишем три эквивалентных уравнений состояния:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu, \\ \downarrow \\ A\dot{x} &= A^2x + ABu, \\ \downarrow \\ A^2\dot{x} &= A^3x + A^2Bu. \end{aligned} \quad (16)$$

В результате векторного сложения данные уравнения объединяются в одно матричное уравнение:

$$(E + A + A^2)\dot{x} = (A + A^2 + A^3)x + (B \quad AB \quad A^2B) \begin{pmatrix} u \\ u \\ u \end{pmatrix}, \quad (17)$$

которое разрешимо относительно управления  $u$ , только тогда, когда ранг матрицы  $(B \quad AB \quad A^2B)$  равен 3.

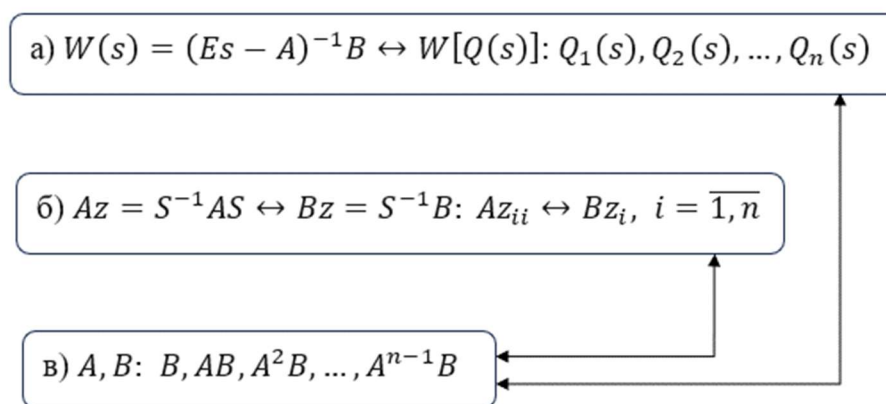


Рисунок 6 - Информационные структуры и элементы альтернативных критериев управляемости

Существование скалярного управления, при котором матричное уравнение (17) и, соответственно, исходное уравнение состояния (1) обращаются в тождество, свидетельствует о том, что, по крайней мере, эти системы третьего порядка являются вполне управляемыми.

Логика приведённого доказательства управляемости системы третьего порядка воспроизводится и справедлива также и для аналогичных линейных систем другого (высшего) порядка.

Приведем примеры использования критерия управляемости Калмана для синтеза системы управления, связанного с установлением критических значений параметров матриц состояния и входа.

**Пример 5.** Система управления задана матрицами состояния и входа:

$$A = \begin{pmatrix} -1 & -3 & 3 \\ 3 & -5 & 3 \\ 6 & -6 & 2 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} a \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Необходимо выяснить существует-ли значение параметра  $a$  матрицы входа, при котором система не удовлетворяет критерию управляемости Кальмана?

Решение представлено на рисунке 7: при критическом значении параметра  $a = 0,5$  система не является вполне управляемой.

**Пример 6.** Система управления задана матрицами состояния и входа:

$$A = \begin{pmatrix} -1 & -3 & 3 \\ 3 & a & 3 \\ 6 & -6 & 2 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

$$A1 := \begin{pmatrix} -1 & -3 & 3 \\ 3 & -5 & 3 \\ 6 & -6 & 2 \end{pmatrix} \quad B1(a) := \begin{pmatrix} a \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$P(a) := \text{augment}(B1(a), A1 \cdot B1(a), A1^2 \cdot B1(a)) \rightarrow \begin{pmatrix} a & -a & 10 \cdot a - 6 \\ 1 & 3 \cdot a - 2 & -2 \\ 1 & 6 \cdot a - 4 & 4 - 12 \cdot a \end{pmatrix}$$

$$|P(a)| \rightarrow 66 \cdot a^2 - 36 \cdot a^3 - 48 \cdot a + 12 \text{ solve} \rightarrow \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \\ \frac{2}{3} - \left(\frac{\sqrt{2}}{3}\right) \cdot i \\ \frac{2}{3} + \frac{1}{3} \cdot \sqrt{2} \cdot i \end{bmatrix} \quad \text{rank}(P(0.5)) = 2$$

Рисунок 7 - Mathcad-документ

Необходимо выяснить существует-ли значение параметра  $a$  матрицы состояния, при котором система не удовлетворяет критерию управляемости Кальмана?

Решение представлено на рисунке 8: система не является вполне управляемой, когда параметр  $a$  принимает критические значения равные -7 и -5,5.

$$A1(a) := \begin{pmatrix} -1 & -3 & 3 \\ 3 & a & 3 \\ 6 & -6 & 2 \end{pmatrix} \quad B1 := \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$P(a) := \text{augment}(B1, A1(a) \cdot B1, A1(a)^2 \cdot B1) \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & -1 & -3 \cdot a - 11 \\ 1 & a + 6 & a^2 + 6 \cdot a + 3 \\ 1 & 2 & -6 \cdot a - 38 \end{pmatrix}$$

$$|P(a)| \rightarrow -6 \cdot a^2 - 75 \cdot a - 231 \text{ solve} \rightarrow \begin{pmatrix} -7 \\ -\frac{11}{2} \end{pmatrix}$$

$$\text{rank}(P(-7)) = 2 \quad \text{rank}(P(-5.5)) = 2$$

Рисунок 8 - Mathcad-документ

### Заключение.

Управляемость рассматривается как одно из фундаментальных свойств систем управления, которое не зависит от начальных условий и внешних возмущений. Для аддитивных моделей систем управления установление факта управляемости любой из её подсистемы с соответствующим скалярным управлением означает, что она управляема в целом, поскольку остальные компоненты вектора управления можно принять равными нулю.

Установлено, что если исследуемую систему со скалярным управлением представить в виде первой канонической формы, то она является вполне управляемой. Причем все дополнительные системы, полученные в результате замены переменных состояния, также являются вполне управляемыми. Информация об управляемости данных систем содержится в общем базисе их передаточных функций в виде полной группы базовых функций.

Показано, что управляемость системы можно установить также в результате использования собственных векторов матрицы состояния для преобразования последней к

диагональному виду, а также матрицы входа. При этом управляемость системы обусловлена отсутствием в матрице входа строк с нулевыми элементами при условии линейной независимости переменных состояния.

Кроме доказательства альтернативных критериев управляемости приведено также доказательство управляемости систем при использовании блочной матрицы управляемости Калмана в авторской редакции.

Приведены примеры и программы решения задач связанных с анализом различных аспектов обеспечения управляемости систем управления, которые могут быть использованы в управлении робототехническими системами.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Елкин, В.И. Об одном условии управляемости систем с сосредоточенными и распределенными параметрами / В.И. Елкин // Труды ИСА РАН. – 2022. – Том 72. 4. – С. 11-16.
2. Крахотко, В.В. *H*-управляемость динамических систем / В.В. Крахотко, Г.П. Размыслович, В.В. Игнатенко // Труды БГТУ. Сер. 3 Физико-математические науки и информатика. – 2020. – № 2. – С. 26-30.
3. Крахотко, В.В. Управляемость ансамбля линейных систем дескрипторным динамическим регулятором / В.В. Крахотко, В.В. Горячкин, В.В. Игнатенко, Г.П. Размыслович // Труды БГТУ. Сер. 3 Физико-математические науки и информатика. – 2022. – № 2. – С. 5-9.
4. Хартовский, В.Е. Полная управляемость и управляемость линейных автономных систем нейтрального типа / В.Е. Хартовский, А.Т. Павловская // Автомат. и телемех. – 2013. – № 5. – С. 59-79.
5. Пантелеев, А.В. Теория управления в примерах и задачах / А.В. Пантелеев, А.С. Бортакровский // М.: Высшая школа. – 2003. – 583 с.
6. Сучилин, В.А. Некоторые замечания по использованию критерия Калмана / В.А. Сучилин // Современные научные исследования и инновации. – 2021. – № 4. [Электронный ресурс].
7. Лю, З. О точной управляемости импульсивных дробных полулинейных функционально-дифференциальных включений / З. Лю, Х. Ли // Asian Journal of Control. – 2015. – Том 17. – № 5. – С. 1857-1865.
8. Деббуш, А. Приближенная управляемость динамических включений с дробной задержкой с нелокальными условиями управления / А. Деббуш, Д. Ф. Торрес // Прикладная математика и вычисления. – 2014. – Том 243. – С. 161-175.
9. Якименко, А.А. Модальная управляемость одной двумерной системы запаздывающего типа / А.А. Якименко // Труды БГТУ. Сер. 3. Физико-математические науки и информатика. – 2023. – № 1. – С. 15-19.
10. Мур Т. Относительная управляемость линейных систем дробного порядка с запаздыванием / Т. Мур, Х. Р. Энрикес // Математическое управление и смежные области. – 2015. – Том 5. – № 4. – С. 845–858.
11. Ван, Д. Полная управляемость дробных эволюционных систем / Д. Ван, Ю. Чжоу // Коммуникации в нелинейной науке и численном моделировании. – Том 17. – № 11. – С. 4346–4355.
12. Калинина, Е. А. К вопросу о конструктивном критерии управляемости. Ч. I. Циклические инвариантные подпространства / Е.А. Калинина, А.М. Камачкин, Н.А. Степенко, Г.Ш. Тамасян // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. – 2023. – № 19. – С. 283-299.
13. Шэнь, Кай. Исследование критериев степеней наблюдаемости, управляемости и идентифицируемости линейных динамических систем / Кай Шэнь, К.А. Неусыпин // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – Том 17. – № 11. – С. 723-731.
14. Сикора, Б. Критерии управляемости дробных систем с запаздыванием по времени / Б. Сикора // Международный журнал прикладной математики и информатики. – 2016. – Том 26. – № 3. – С. 521–531.

---

**Чернышев Владимир Иванович**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева, г. Орел»  
Профессор кафедры мехатроники, механики и  
робототехники  
302020 г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
E-mail: chernyshev\_46@mail.ru

---

**Фомина Ольга Владимировна**

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

---

V.I. CHERNYSHEV, O.V. FOMINOVA

## CONTROL SYSTEMS: THEORETICAL ASPECTS OF CONTROLLABILITY

**Abstract.** *Controllability is considered as one of the fundamental properties of control systems, which does not depend on initial conditions and external disturbances. For additive models of control systems, establishing the fact of controllability of any of its subsystems with the corresponding scalar control means that it is controllable as a whole, since the remaining components of the control vector can be taken equal to zero. It has been established that if the system under study with scalar control is represented in the form of the first canonical form, then it is completely controllable. Moreover, all additional systems obtained as a result of replacing state variables are also completely controllable. Information about the controllability of these systems is contained in the general basis of their transfer functions in the form of a complete group of basic functions. It is shown that the controllability of the system can also be established by using the eigenvectors of the state matrix to transform the latter to a diagonal form, as well as the input matrix. In this case, the controllability of the system is due to the absence of rows with zero elements in the input matrix, provided that the state variables are linearly independent. In addition to the proof of alternative controllability criteria, a proof of the controllability of systems using the Kalman block controllability matrix in the author's edition is also given. Examples and programs for solving problems related to the analysis of various aspects of ensuring controllability of control systems are given.*

**Keywords:** *control system, controllability, controllability criterion, system matrices, eigenvector matrix, transfer function.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Yelkin, V.I. Ob odnom uslovii upravlyayemosti sistem s sosredotochennymi i raspredelennymi parametrami / V.I. Yelkin // Trudy ISA RAN. – 2022. – Tom 72. 4. – S. 11-16.
2. Krakhotko, V.V. N-upravlyayemost' dinamicheskikh sistem / V.V. Krakhotko, G.P. Razmyslovich, V.V. Ignatenko // Trudy BGTU. Ser. 3 Fiziko-matematicheskiye nauki i informatika. – 2020. – № 2. – S. 26-30. 3. Krakhotko, V.V. Upravlyayemost' ansamblya lineynykh sistem deskriptornym dinamicheskim regul'yatorom / V.V. Krakhotko, V.V. Goryachkin, V.V. Ignatenko, G.P. Razmyslovich // Trudy BGTU. Ser. 3 Fiziko-matematicheskiye nauki i informatika. – 2022. – № 2. – S. 5-9.
4. Khartovskiy, V.Ye. Polnaya upravlyayemost' i upravlyayemost' lineynykh avtonomnykh sistem neytral'nogo tipa / V.Ye. Khartovskiy, A.T. Pavlovskaya // Avtomat. i telemekh. – 2013. – № 5. – S. 59-79.
5. Panteleyev, A.V. Teoriya upravleniya v primerakh i zadachakh / A.V. Panteleyev, A.S. Bortakovskiy // M.: Vysshaya shkola. – 2003. – 583 s.
6. Suchilin, V.A. Nekotoryye zamechaniya po ispol'zovaniyu kriteriya Kalmana / V.A. Suchilin // Sovremennyye nauchnyye issledovaniya i innovatsii. – 2021. – № 4. [Elektronnyy resurs].
7. Lyu, Z. O tochnoy upravlyayemosti impul'sivnykh drobnnykh polulineynykh funktsional'no-differentsial'nykh vkl'yucheniyy / Z. Lyu, KH. Li // Asian Journal of Control. – 2015. – Tom 17. – № 5. – S. 1857-1865.
8. Debbush, A. Priblizhennaya upravlyayemost' dinamicheskikh vkl'yucheniyy s drobnoy zaderzhkoy s nelokal'nymi usloviyami upravleniya / A. Debbush, D. F. Torres // Prikladnaya matematika i vychisleniya. – 2014. – Tom 243. – S. 161-175.
9. Yakimenko, A.A. Modal'naya upravlyayemost' odnoy dvumernoy sistemy zapazdyvayushchego tipa / A.A. Yakimenko // Trudy BGTU. Ser. 3. Fiziko-matematicheskiye nauki i informatika. – 2023. – № 1. – S. 15-19.
10. Mur T. Otnositel'naya upravlyayemost' lineynykh sistem drobnogo poryadka s zapazdyvaniye / T. Mur, KH. R. Enrikes // Matematicheskoye upravleniye i smezhnyye oblasti. – 2015. – Tom 5. – № 4. – S. 845-858.
11. Van, D. Polnaya upravlyayemost' drobnnykh evolyutsionnykh sistem / D. Van, YU. Chzhou // Kommunikatsii v nelineynoy nauke i chislennom modelirovanii. – Tom 17. – № 11. – S. 4346-4355.
12. Kalinina, Ye. A. K voprosu o konstruktivnom kriterii upravlyayemosti. CH. I. Tsiklicheskiye invariantnyye podprostranstva / Ye.A. Kalinina, A.M. Kamachkin, N.A. Stepenko, G.SH. Tamasyan // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Prikladnaya matematika. Informatika. Protssy upravleniya. – 2023. – № 19. – S. 283-299.
13. Shen', Kay. Issledovaniye kriteriyev stepeney nablyudayemosti, upravlyayemosti i identifikatsionnykh lineynykh dinamicheskikh sistem / Kay Shen', K.A. Neusypin // Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye. – 2016. – Tom 17. – № 11. – S. 723-731.
14. Sikora, B. Kriterii upravlyayemosti drobnnykh sistem s zapazdyvaniyem po vremeni / B. Sikora // Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnoy matematiki i informatiki. – 2016. – Tom 26. – № 3. – S. 521-531.

**Chernyshev Vladimir Ivanovich**

Orel State University

Professor of the Department of Mechatronics, Mechanics and Robotics

302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29

E-mail: chernyshev\_46@mail.ru

**Fominova Olga Vladimirovna**

Orel State University

Associate Professor of the Department of Mechatronics, Mechanics and Robotics

302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29

E-mail: chernyshev\_46@mail.ru

ЧЖОУ ИНЧУНЬ, С.В. КИСЛОВ, ЛИ ШЭНБО, ХУ ДЖИГАН,  
Р.Н. ПОЛЯКОВ, Л.А. САВИН

## ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ С МИНЕРАЛЬНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

**Аннотация.** *Повышение триботехнических качеств поверхностей трения в различных по назначению, геометрии контакта, условиям смазывания является актуальной задачей и поиск новых технологических решений требует адекватной оценки на основании экспериментальных исследований. В статье представлены результаты экспериментальных исследований пар трения из антифрикционных материалов для подшипников скольжения с минеральными покрытиями, которые представляют собой модифицированный слой исходного материала (сталь, бронза, пластик) с внедрёнными на глубину до 50 мкм измельчёнными частицами из природных минералов. В результате поверхность трения обретает улучшенные характеристики износостойкости по сравнению с базовым материалом. Отмечается, что использование минеральных покрытий позволяет уменьшить коэффициент трения на 20% по сравнению с базовым материалом и снизить интенсивность изнашивания в 3 раза.*

**Ключевые слова:** *антифрикционные материалы, минеральные покрытия, подшипник скольжения, трибология, коэффициент трения, интенсивность изнашивания.*

### Введение

Необратимость процесса изнашивания требует поиска всё новых подходов повышения износостойкости пар трения машин и механизмов: подшипники скольжения, штоки, уплотнения, зубчатые и червячные передачи, резьбовые соединения, направляющие скольжения, ролики прокатного оборудования и многие другие. В наиболее ответственных механизмах допущение предельного изнашивания деталей ведёт к повреждениям сопряжённых деталей и существенному росту издержек на ремонт, не говоря о потерях при авариях и внезапных отказах.

Износ валков прокатных станов приводит к ухудшению качества проката, возрастанию динамических нагрузок на опоры и элементы крепления, в подшипниках скольжения изменяется геометрия и величина рабочего зазора, возрастают динамические нагрузки.

Полное истирание антифрикционного слоя подшипника скольжения приводят к повреждениям сопряжённых деталей: корпуса и цапфы вала, что в последствии приводит к существенному удорожанию ремонта.

Поиск технологий повышающих триботехнические качества поверхностей трения (коэффициент трения, интенсивность изнашивания, износостойкость, коррозионная стойкость, стойкость к заеданию и др.) постоянно ведётся научным сообществом в сотрудничестве с промышленными партнёрами. Среди основных направлений можно выделить: оптимизацию геометрических характеристик пар трения под конкретные условия эксплуатации, расчётное обеспечение режима жидкостного трения на максимально возможных режимах работы пары трения, применение самосмазывающихся решений, применение смазочных материалов с улучшенными противоизносными характеристиками и обладающими способностью избирательного переноса, модификация поверхностного слоя пар трения путём нанесения, внедрения частиц противоизносных материалов или полного перекрытия слоем другого материала, обладающего антифрикционными качествами [1,2].

### Описание технологии минеральных покрытий

Научно-производственное объединение «Технологии минеральных покрытий» [3] разработало уникальную технологию получения поверхностей трения с улучшенными качествами путём проникновения минеральных частиц сквозь поверхностный слой материала.

Технология минеральных покрытий представляет собой совокупность технических приёмов формирования поверхностей пар трения путём комбинации механического, электрического и звукового воздействий на объект нанесения и минеральные частицы с размером менее 100 нм. В качестве исходного сырья выступают природные минералы,

например серпентины и им подобные, состоящие в основном из структур типа  $Mg_3[Si_2O_5](OH)_4$ , а также включающие иногда в себя примеси  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ , Al, Ni, иногда Ti, Mn, Ca.

В результате минеральные частицы внедряются в кристаллическую решётку обрабатываемого металла и, тем самым, модифицируют поверхность и приграничные слои глубиной до 50 мкм по следующим направлениям: повышение микротвёрдости, снижение коэффициента трения, уменьшение пористости, снижение шероховатости исходной поверхности.

Универсальность технологии позволяет наносить минеральные покрытия на фактически любые поверхности, используемые для производства пар трения: бронза, латунь, медь, алюминий, баббиты, низколегированные и высоколегированные стали, нержавеющие и немагнитные стали, чугун, титан, пластики (фторопласт, капролон) и твёрдая резина.

#### Результаты экспериментальных исследований и опытной эксплуатации

На рисунке 1 представлено увеличенное изображение среза обработанного металлического образца из стали 20Cr13 с нанесёнными минеральными покрытиями.

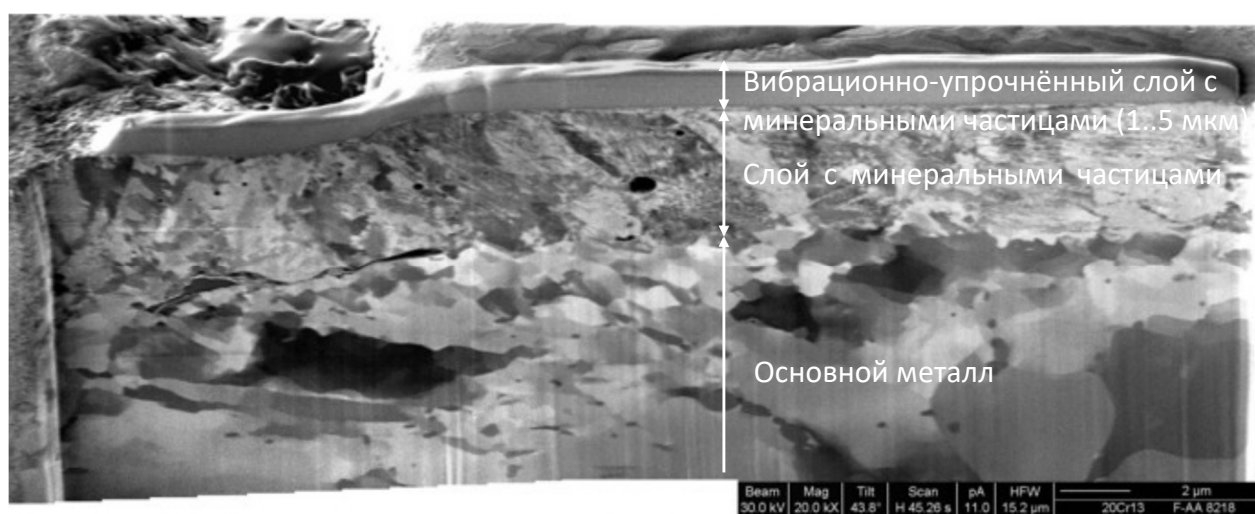


Рисунок 1 – Структура поверхностного слоя металла с минеральными покрытиями

Результаты экспериментов, выполненных в институте ВАМ [4], доказали повышение триботехнических качеств поверхностей трения с минеральными покрытиями в части повышения микротвёрдости поверхности сравнению с базовым материалом (до 40%), снижение интенсивности изнашивания (от 25% и более), снижение коэффициента трения (до 40%). Результаты исследований пары трения «сталь-сталь», контакт «плоскость-цилиндр» частично представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Результаты эксперимента

Материал 102Cr6	Твердость, МПа	Коэффициент изнашивания, $мм^3/Н \cdot м$	Коэффициент трения
Без покрытия	2139	$1,97 \cdot 10^{-9}$	0,09
С покрытием	3585	$0,884 \cdot 10^{-9}$	0,07

Одной из выигрышных позиций является снижение коэффициента изнашивания более чем в два раза, что главное направление применения это использование в парах трения, где работа проходит либо полностью, либо частично в режиме сухого трения.

В первую очередь, это могут быть гидродинамические подшипники скольжения, в которых переход в режим полного разделения трущихся поверхностей слоем смазки происходит при достижении определенной скорости. Повышение износостойкости поверхностей трения актуально для клапанов запорной арматуры, лопаток турбин, червячных



передач, резьбовых поверхностей, колёс центробежных насосов, роликов прокатного оборудования, колёсных пар железнодорожного транспорта и мн.др. На рисунке 2 приведен пример повышения эксплуатационных характеристик ролика прокатного стана по сравнению с базовой конструкцией путём нанесения минерального покрытия. Так при исходных характеристиках ролик в клети прокатного стана работал 8 месяцев до достижения предельного износа, что соответствовало выработке 600 000 тонн проката. После нанесения минерального покрытия ресурс ролика возрос до 42 месяцев, что соответствует 3 375 000 тонн проката. На рисунках 2 в,г приведены примеры применения минеральных покрытий для запорной аппаратуры, эксплуатируемой в условиях агрессивных сред. С помощью нанесения минеральных покрытий на рабочие поверхности удалось добиться повышения ресурса в три раза по сравнению с исходными материалами клапанов.



**Рисунок 2 – Примеры пар трения с минеральными покрытиями и результаты опытной эксплуатации**

Для подтверждения заявленных характеристик повышения износостойкости пар трения с минеральными покрытиями был подготовлен и проведён эксперимент на базе триботехнической лаборатории завода ZOB [5].

На рисунке 3а представлен общий вид экспериментальной установки для исследования триботехнических характеристик НДМ-20, которая относится к классу торцевых трибометров для исследования пар трения в контакте «плоскость – плоскость».

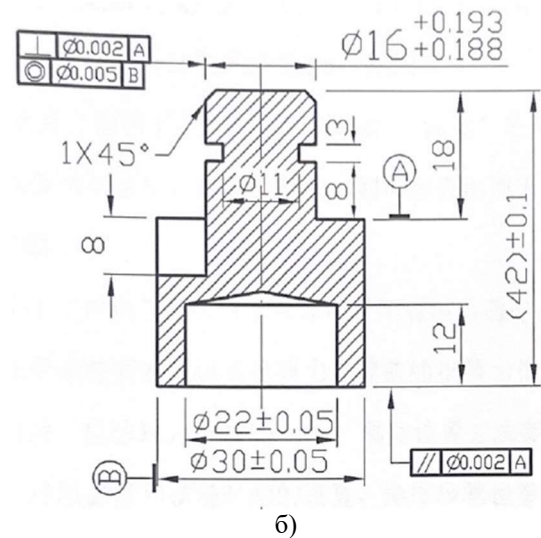
Контрольно-измерительная система ЭУ позволяет управлять и контролировать следующие параметры:

- нагрузка на образец  $0 \div 19600$  Н;

- скорость вращения  $0 \div 2800$  об/мин;
- крутящий момент  $0 \div 40$  Н•м при частоте вращения  $150 \div 1500$  об/мин;
- крутящий момент  $0 \div 20$  Н•м при частоте вращения  $1500 \div 2800$  об/мин;
- температура до  $300$  °С (точность измерения температуры  $\pm 1,0$  °С)
- точность  $\pm 1,0\%$ ;
- мощность главного двигателя  $7,5$  кВт;
- форма и размеры испытуемых образцов:
- круг, наружный диаметр менее  $30$  мм, внутренний диаметр менее  $25$  мм;
- квадрат,  $41 \times 41$  мм;
- условия смазывания: сухое, в масляной ванне (смазка масло с индексом кинематической вязкости 32);
- контртело выполнено из стали 40Х с твёрдостью HB235-260, шероховатость Ra  $0.8$  (рисунок 3б).



а)



б)

Рисунок 3 – Общий вид экспериментальной установки (а) и эскиз контртела (б)

На рисунке 4 представлен типовой протокол испытаний, формируемый программным обеспечением в автоматическом режиме. Управляющими факторами эксперимента являются скорость скольжения, нормальная нагрузка к площади контакта, наличие смазочного материала. Контролируемыми факторами являются: температура, момент сопротивления, коэффициент трения (вычисляется косвенно), время эксперимента, путь трения, глубина изнашивания образца.

Под параметры экспериментальной установки были изготовлены образцы пластин с различными видами покрытий, условно обозначенных номерами от 1 до 5 без раскрытия состава минерального сырья и технологии создания покрытия.

Испытания проводились в двух режимах трения: сухое трение и в масляной ванне, что соответствует режиму граничного трения. На рисунке 5 представлены фотографии образцов до и после испытаний. В режиме сухого трения большинство образцов показывали сравнительно высокий коэффициент трения, очень быстро доходили до уставки предельной температуры и установка автоматически выключалась.



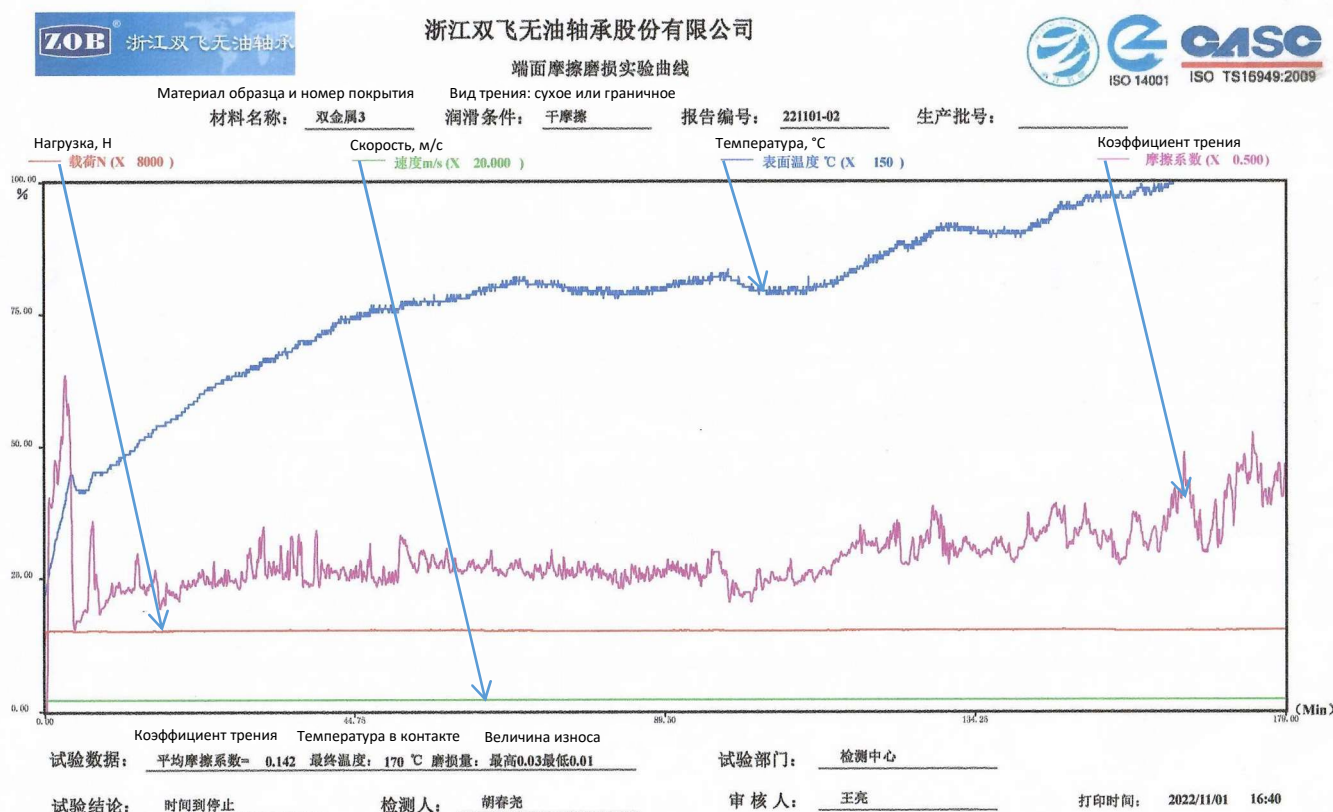
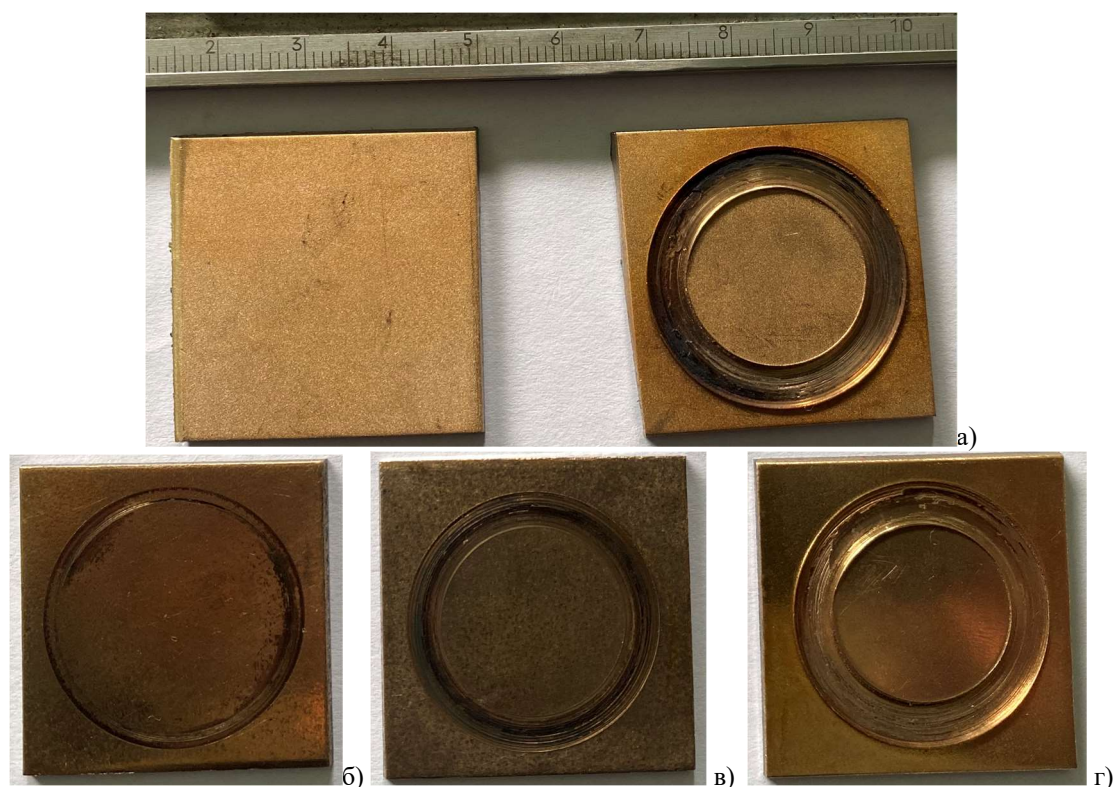


Рисунок 4 – Протокол испытаний: контролируемые и измеряемые параметры эксперимента

На рисунке 5а контробразец из биметаллического сплава без покрытия: сухое трение, время работы 180 минут, температура в контакте 170 °C, коэффициент трения 0,134, интенсивность изнашивания  $1.4 \cdot 10^{-9}$  мм<sup>3</sup>/Н·м. На рисунке 5б образец из биметаллического сплава с покрытием №2: сухое трение, время работы 170 минут, температура в контакте 135 °C, коэффициент трения 0,124, интенсивность изнашивания  $0.30 \cdot 10^{-9}$  мм<sup>3</sup>/Н·м. На рисунке 5в образец из биметаллического сплава с покрытием №4: сухое трение, время работы 180 минут, температура в контакте 170 °C, коэффициент трения 0,142, интенсивность изнашивания  $0.66 \cdot 10^{-9}$  мм<sup>3</sup>/Н·м. На рисунке 5г образец из биметаллического сплава с покрытием №5: сухое трение, время работы 23 минуты, температура в контакте 170 °C, коэффициент трения 0,270, интенсивность изнашивания  $4.13 \cdot 10^{-8}$  мм<sup>3</sup>/Н·м.

В результате проведения серии экспериментов были получены следующие результаты относительно коэффициентов трения и интенсивности изнашивания в режиме граничного трения (таблица 2). Можно говорить о том, что наилучшие показатели имеют образцы с минеральными покрытиями №2, №3 и №4. При этом интенсивность изнашивания в режиме сухого трения уменьшается в 2,5...3 раза по сравнению с образцами из базового материала. Также можно увидеть уменьшение коэффициента сухого трения по сравнению с базовыми материалами пар трения. Например, для пары трения «сталь – сталь» коэффициент сухого трения 0,30...0,40 [6], при модификации одной из поверхностей минеральными покрытиями коэффициент сухого трения снижается до 0,20...0,25. Для пары трения «сталь – биметалл» согласно внутренним исследованиям ZOB коэффициент сухого трения 0,18...0,2, после модификации поверхности минеральными покрытиями удалось добиться значения коэффициента сухого трения 0,12...0,14.

Очевидно, что дифundирование минеральных частиц сквозь поверхностный слой металла формирует модифицированную поверхность с улучшенными качествами по износостойкости, твёрдости и антифрикционным свойствам.



**Рисунок 5 – Образцы из биметаллического сплава:**

а) контрольный образец без покрытия до и после испытаний;  
б) образец с минеральным покрытием №3; в) образец с минеральным покрытием №5

**Таблица 2 – Результаты исследований образцов в режиме граничной смазки**

Материал и номер покрытия	Коэффициент трения	Интенсивность изнашивания в режиме граничной смазки, $\text{мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$
Сталь, №3	0.139	$0.66 \cdot 10^{-9}$
Биметалл, №4	0.087	$0.66 \cdot 10^{-9}$
Сплав 10-10, №3	0.083	$0.26 \cdot 10^{-9}$
Сплав 10-10, №4	0.107	$0.4 \cdot 10^{-9}$
Сплав 6501, №3	0.06	$0.13 \cdot 10^{-9}$
Сплав 6501, №3	0.08	$0.2 \cdot 10^{-9}$

### Заключение

Технология минеральных покрытий, основы которой заложил академик В.И. Вернадский в 20-30 гг. прошлого века, доведена до практического внедрения инженерами ООО «НПЦ Технологии минеральных покрытий», отработаны технологические операции и создано уникальное российское оборудование.

Нанесение возможно фактически на любые конструкционные материалы: бронза, латунь, медь, алюминий, низколегированные и высоколегированные стали, титан и чугун, нержавеющие и немагнитные стали, пластики и твёрдая резина.

Условия работы в агрессивных средах: ограниченная смазка или без смазки, морская вода, повышенная влажность, абразивная пыль, сероводород, соляной туман, рабочие температуры до 1200 °С.

Потребительская ценность технологии:

- 1) увеличение срока службы узла до 7-10 раз;
- 2) сохранение геометрических размеров обрабатываемых деталей;
- 3) температура технологической операции при нанесении покрытий не превышает 50-70°С, что исключает температурные деформации обрабатываемой детали;

- 4) возможность локального упрочнения и нанесения покрытия на рабочую зону детали;
- 5) отсутствие необходимости создания масок для защиты непокрываемых элементов детали;
- 6) нет ограничения по размерам и формам обрабатываемых элементов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крагельский И.В. Трение, изнашивание и смазка: справочник в 2-х кн.. – М.: Машиностроение, 1978. – 400 с.
2. Czichos, H., Habig, K.-H., Tribologie-Handbuch, Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik, 3., überarbeitet und erweiterte Auflage, Vieweg und Teubner, 2010.
3. НПЦ Технологии минеральных покрытий. [Электронный ресурс]. 2024. URL: <https://mico-tech.com> (дата обращения 20.02.2024).
4. Wear resistance of a metal surface modified with minerals / S.V. Kislov, V.G. Kislov, P.V. Balasch, A.V. Skazochkin, G.G. Bondarenko and A.N. Tikhonov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 110 (2016) 012096 doi:10.1088/1757-899X/110/1/012096
5. ЗАО «Чжэцзянская компания по производству безмаслянных подшипников «Шуанфей». [Электронный ресурс]. 2024. URL: <http://www.zobcn.com> (дата обращения 20.02.2024).
6. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. Изд. 8-е в 3-х т., Т1 – М.: Машиностроение, 1999.

#### **Чжоу Инчунь**

ЗАО «Чжэцзянская компания по производству безмаслянных подшипников «Шуанфей»,  
генеральный директор  
КНР, провинция Чжэцзян, г.Цзясин, округ Цзяшань,  
улица Хунвэй, 18  
Тел.: +86-0573-8451 8018  
E-mail: [info@sf-bearing.com](mailto:info@sf-bearing.com)

#### **Ли Шэнбо**

Сямыньский технологический университет  
профессор института машиностроения и автомобилестроения  
КНР, провинция Фудзянь, г. Сямынь,  
район Джимей, дорога Лигонг, д.600  
Тел.: +86 13395994920  
E-mail: [hit4057@xmut.edu.cn](mailto:hit4057@xmut.edu.cn)

#### **Поляков Роман Николаевич**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»,  
доктор техн. наук, зав. кафедрой мехатроника,  
механика и робототехника  
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 29  
Тел.: +79038819381  
E-mail: [romanpolak@mail.ru](mailto:romanpolak@mail.ru)

#### **Кислов Станислав Валентинович**

ООО «НПЦ Технологии минеральных покрытий»,  
генеральный директор  
248010, г.Калуга, ул. Парковая, 12В  
Тел.: +79109151550  
E-mail: [info@sf-bearing.com](mailto:info@sf-bearing.com)

#### **Ху Джиган**

ЗАО «Чжэцзянская компания по производству безмаслянных подшипников «Шуанфей»,  
заместитель генерального директора  
КНР, провинция Чжэцзян, г.Цзясин, округ Цзяшань,  
улица Хунвэй, 18  
Тел.: +86-0573-8451 8018  
E-mail: [info@sf-bearing.com](mailto:info@sf-bearing.com)

#### **Савин Леонид Алексеевич**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»,  
доктор техн. наук, профессор кафедры мехатроника,  
механика и робототехника  
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 29  
Тел.: +79605484661  
E-mail: [savin3257@mail.ru](mailto:savin3257@mail.ru)

---

ZHOU YINCHUN, S.V. KISLOV, LI SHENGBO, HU ZHIGANG,  
R.N. POLYAKOV, L.A. SAVIN

### TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF FRICTION SURFACES WITH MINERAL COATINGS

**Abstract.** Improving the tribotechnical qualities of friction surfaces with different purposes, contact geometry, and lubrication conditions is an urgent task, and the search for new technological solutions requires an adequate assessment based on experimental studies. The article presents the results of experimental studies of friction pairs made of antifriction materials for sliding bearings with mineral coatings, which are a modified layer of the original material (steel, bronze, plastic) with crushed particles from natural minerals embedded to a depth of 50 microns. As a result, the friction surface acquires improved wear resistance characteristics compared to base materials. It is noted that the use of

mineral coatings makes it possible to reduce the coefficient of friction by 20% compared to the base material and reduce the wear rate by 3 times.

**Keywords:** *antifriction materials, mineral coatings, plain bearings, tribology, friction coefficient, wear rate.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Kragelsky I.V. Friction, wear and lubrication: a reference book in 2 books. – M.: Mashinostroenie, 1978. – 400 p.
2. Czichos, H., Habig, K.-H., Tribologie-Handbuch, Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik, 3., überarbeitet und erweiterte Auflage, Vieweg und Teubner, 2010.
3. NPC Mineral Coating Technologies. [Electronic resource]. 2024. URL: <https://mico-tech.com> (accessed 02/20/2024).
4. Wear resistance of a metal surface modified with minerals / S.V. Kislov, V.G. Kislov, P.V. Balasch, A.V. Skazochkin, G.G. Bondarenko and A.N. Tikhonov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 110 (2016) 012096 doi:10.1088/1757-899X/110/1/012096
5. Zhejiang SF Oilless Bearing Co., Ltd. [Electronic resource]. 2024. URL: <http://www.zobcn.com> (accessed 02/20/2024).
6. Anuriev V.I. Handbook of mechanical engineering designer. Ed. 8th in 3 volumes, T1 - M.: Mechanical Engineering, 1999.

### **Zhou Yinchun**

Zhejiang SF Oilless Bearing Co., Ltd.  
Chairman  
China, Zhejiang Province, Jiaxing City, Jiashan County,  
North Hongwei Road, №18  
Тел. +86-0573-8451 8018  
E-mail: [info@sf-bearing.com](mailto:info@sf-bearing.com)

### **Kislov Stanislav Valentinovich**

LLC MicoTech,  
Chairman  
248010, Kaluga, Parkovaya street, 12V  
Тел. +79109151550  
E-mail: [s.kislov@mico-tech.com](mailto:s.kislov@mico-tech.com)

### **Li Shengbo**

Xiamen University of Technology  
professor of School of Mechanical and Automotive  
Engineering  
China, Fujian Province, Xiamen City, Jimei District,  
Ligong Road, №600  
Тел. +86 13395994920  
E-mail: [hit4057@xmut.edu.cn](mailto:hit4057@xmut.edu.cn)

### **Hu Zhigang**

Zhejiang SF Oilless Bearing Co., Ltd.  
deputy general manager  
China, Zhejiang Province, Jiaxing City, Jiashan County,  
North Hongwei Road, №18  
Тел. +86-0573-8451 8018  
E-mail: [info@sf-bearing.com](mailto:info@sf-bearing.com)

### **Polyakov Roman Nikolaevich**

Orel State University named after I.S. Turgenev  
doctor of technical sciences, head of the department  
mechatronics, mechanics and robotics  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
Ph.: +79038819381  
E-mail: [romanpolak@mail.ru](mailto:romanpolak@mail.ru)

### **Savin Leonid Alexeevich**

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  
Ph.: +79605484661  
E-mail: [savin3257@mail.ru](mailto:savin3257@mail.ru)

© Чжоу Инчунь, С.В. Кислов, Ли Шэнбо, Ху Джиган, Р.Н. Поляков, Л.А. Савин, 2024

А.С. ФЕТИСОВ, П.И. ЛЕВЫХ

## ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИХ ДЕМПФЕРОВ СЖАТИЯ

**Аннотация.** В статье представлена математическая модель роторной системы на подшипниках качения на магнитореологических демпферах сжатия. В качестве основной использована модель жесткого ротора. Математическая модель демпфера сжатия, использующего магнитореологическую жидкость в качестве рабочего тела, основана на уравнении Рейнольдса и реологической модели Бингама. Представлены результаты численного решения задачи течения магнитореологической жидкости под действием сжимающих сил в виде зависимостей коэффициентов жесткости и демпфирования жидкостного демпфера от величины индукции магнитного поля.

**Ключевые слова:** магнитореологический демпфер сжатия, уравнение Рейнольдса, математическая модель, динамические коэффициенты.

### Введение

Разработка новых видов активных демпфирующих устройств является актуальной научно-технической задачей. Одним из направлений исследований является управление давлением/расходом рабочей жидкости [1]. Альтернативой является использование магнитореологических/электрореологических жидкостей в конструкции активного демпфера [2-3]. Сложное реологическое поведение магнитореологических жидкостей под действием внешних электромагнитных полей вносит дополнительные сложности при моделировании интегральных и динамических характеристик роторных систем, использующих магнитореологические демпферы. Существующие подходы к моделированию не учитывают нелинейные динамические характеристики магнитореологических жидкостей [4-8]. Применение линеаризованных моделей магнитореологических демпферов относится к начальной области исследования нелинейных эффектов динамического поведения магнитореологических жидкостных демпферов [9-10].

### Исследование динамических характеристик магнитореологических демпферов сжатия

Целью данного исследования являются интегральные и динамические характеристики жидкостных демпферов сжатия, использующих магнитореологические жидкости для управления динамическим поведением роторной системы. В соответствии с целью работы в качестве основной конфигурации может быть обоснован выбор роторной системы, включающей жесткий ротор на подшипниках качения. Конструкция магнитореологического демпфера сжатия приведена в работе [11].

Концептуальная модель магнитореологического демпфера сжатия (МРДС) основана на следующих допущениях: 1) магнитореологическая жидкость является однородной средой, реологические характеристики которой одинаковы во всем объеме течения; 2) неидеальности формы зазора МРДС и шероховатости поверхностей не рассматриваются; 3) течение магнитореологической жидкости изотермическое; 4) подшипник качения зафиксирован во внутреннем кольце демпфера, которое не имеет осевой вращательной степени свободы. Также принимаются классические допущения теории гидродинамики [12]. Ввиду предложенных допущений и ограничений математическая модель может быть описана с использованием уравнения Рейнольдса:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \right] = 6U \frac{\partial h}{\partial x} - 12V, \quad (1)$$

где  $h$  - функция зазора,  
 $p$  - давление смазочного материала,  
 $\mu$  - динамическая вязкость смазочного материала,  
 $U$  и  $V$  линейные скорости поверхности вала.

Для учета реологического поведения МРЖ используется модель Бингама:

$$\tau = \tau_y + \mu \dot{\gamma}, \quad (2)$$

где  $\tau_y$  - дополнительное касательное напряжение, зависящее от величины приложенного магнитного поля,

$\tau$  - общее касательное напряжение,

$\dot{\gamma}$  - производная скорости сдвига.

В рамках получения модернизированного уравнения Рейнольдса существуют 2 равнозначных подхода. При использовании первого подхода динамическая вязкость смазочного материала заменяется на эквивалентную вязкость, которая зависит от предела текучести, зависящего от напряженности магнитного поля [13]:

$$\mu_y = \begin{cases} \mu_{cm} + \tau_0(H) / \dot{\gamma}, & \dot{\gamma} > \frac{\tau_0(H)}{\mu_{cm} - M\mu_{cm}} \\ \mu_{cm}, & \dot{\gamma} \leq \frac{\tau_0(H)}{\mu_{cm} - M\mu_{cm}} \end{cases} \quad (3)$$

где  $M$  – коэффициент вязкости.

При использовании второго подхода производится анализ области течения на предмет сужения или расширения зазора, и в таком случае уравнение Рейнольдса для одномерного течения принимает следующий вид [14]:

$$\begin{aligned} h^3 \frac{\partial p}{\partial z} + 3h^2 \tau_0 + 8\tau_c^3 / \left( \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right) - 12\tau_0 \tau_c^3 / \left( \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right) - \frac{8}{M\mu} \tau_c^3 / \left( \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right) &= 12\mu \frac{\partial h}{\partial z} Z, \quad U > 0 \\ h^3 \frac{\partial p}{\partial z} - 3h^2 \tau_0 - 8\tau_c^3 / \left( \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right) + 12\tau_0 \tau_c^3 / \left( \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right) + \frac{8}{M\mu} \tau_c^3 / \left( \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right) &= 12\mu \frac{\partial h}{\partial z} Z, \quad U < 0 \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\tau_c$  - напряжение сдвиговых деформаций на границе течения.

В данном исследовании был использован подход с эквивалентной вязкостью. Алгоритм решения данной задачи заключался в первоначальном определении скоростей течения жидкости в зазоре демпфера, оценке вязкости и дальнейшем поэтапном пересчете скоростей с учетом новых значений эквивалентной вязкости. Процесс решения считался завершенным при снижении общей погрешности менее  $10^{-3}$ , либо при достижении заданного количества шагов. В качестве численного метода использовался метод конечных разностей. Зависимость предела текучести магнитореологической жидкости от напряженности электромагнитного поля является паспортной характеристикой [15], а зависимость напряженности электромагнитного поля от величины силы тока электромагнита представлена в работе [11].

Результатом решения гидродинамической задачи являлось распределение полей давлений в зазоре демпфера (рисунок 1,а). Результаты решения задачи гидродинамики сравнивались с решениями, полученными другими авторами [14]. Валидация результатов показала удовлетворительную сходимость.

При моделировании динамического поведения роторной системы с МРДС было принято, что виброперемещения ротора в подшипниках качения малы из-за крайне высокой радиальной жесткости подшипников данного типа. Таким образом, вращательное движение ротора поддерживалось подшипниками качения, а радиальные виброперемещения ротора воспринимаются МРДС, что позволяет упростить двухмассовую модель динамики роторной системы и представить ее в классическом одномассовом варианте с учетом специфичности расчета грузоподъемности демпфера. Уравнение движения ротора в МРДС имеет следующий вид:

$$m \, d\vec{V} / dt = 2\vec{F} + \vec{F}^\Omega \quad (4)$$

где  $m$  - масса ротора,



$\vec{F}$  - реакция магнитореологической жидкости,

$\vec{F}^\Omega$  - результирующая сила, которая является суммой сил дисбаланса и сил тяжести:

$$\vec{F}^\Omega = m\Delta\omega^2 \begin{bmatrix} \sin \omega t \\ \cos \omega t \end{bmatrix} + m \begin{bmatrix} 0 \\ -g \end{bmatrix} \quad (5)$$

где  $m\Delta$  - дисбаланс ротора,

$g$  - ускорение свободного падения.

Характеристики роторной системы представлены в таблице 1.

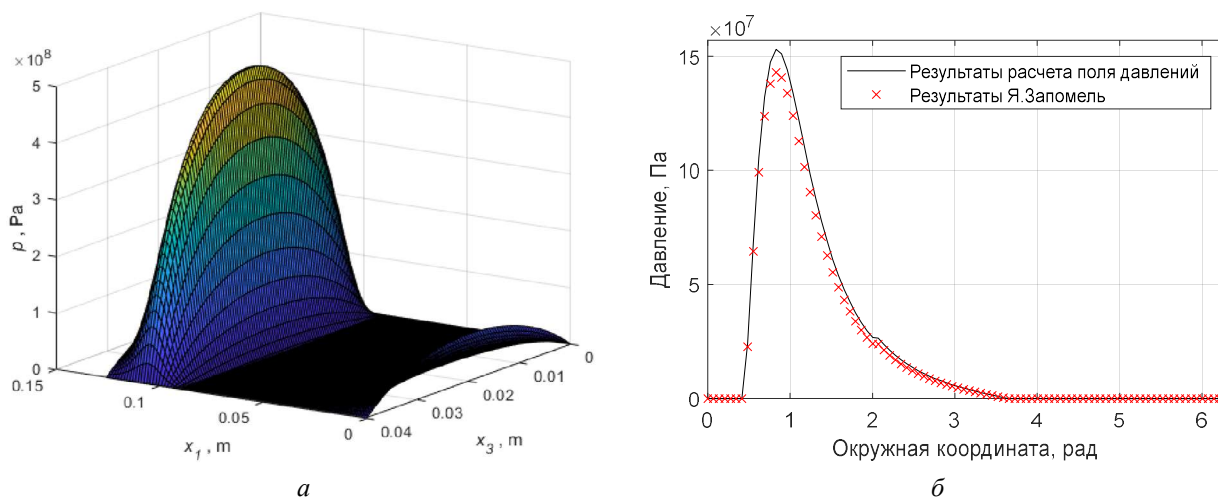


Рисунок 1 – Распределение давлений в МРДС (а), сравнение результатов с [14] (б)

Характеристики роторной системы представлены в таблице 1.

Параметр	Величина	
Длина демпфера, мм		
Диаметр внутреннего кольца, мм		
Средний зазор, мм		
Давление, бар		
Вязкость смазочного материала, Па·с		
Масса ротора, кг		
Размерность сетки	40x40	
Частота вращения, об/мин		
Величина дисбаланса, кг·м		
Параметры эксперимента		
	Верхний предел	Нижний предел
Сила тока, А		

В рамках данного исследования был проведен вычислительный эксперимент по расчету траекторий движения ротора в МРДС при различных величинах силы тока на электромагните (рисунок 2).

Результаты моделирования траекторий движения показывают, что увеличение силы тока на электромагните приводит к уменьшению как вертикальных, так и горизонтальных амплитуд виброперемещений, что связано с увеличением жесткости и демпфирования смазочного слоя демпфера. Под действием силы тяжести траектории смешаются к нижнему краю зазора МРДС, и при дальнейшем увеличении силы тока происходит касание внутреннего и внешнего колец демпфера.



Расчет динамических коэффициентов магнитореологического демпфера сжатия имеет ряд особенностей. Для опор скольжения требуется определить положение подвижного равновесия для сбалансированного ротора, а затем методом малых перемещений определить изменение величины проекций сил. В случае применения в роторной системе с МРДС ротора с нулевым дисбалансом в уравнении движения (4) реакция слоя магнитореологической жидкости будет равна нулю ввиду отсутствия эффектов клина или сдавливания, поэтому ротор за определенное время «утонет» в зазоре демпфера. А наличие сил дисбаланса является причиной возникновения вынужденных колебаний (рисунок 2).

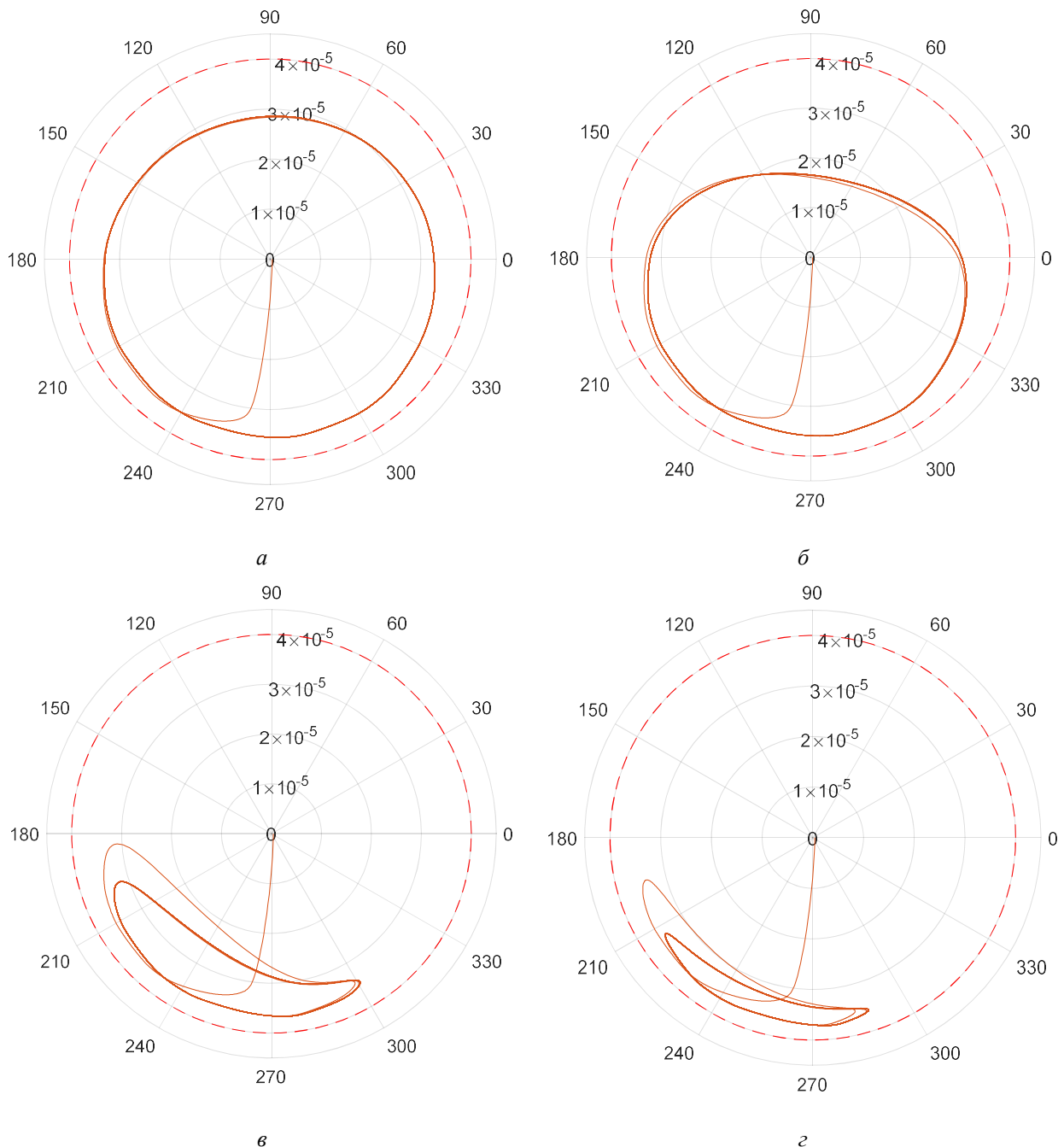


Рисунок 2 – Траектории движения ротора в МРДС: 0А (а), 0,25А (б), 0,5А(в), 0,75 А (г)

Выходом является определение «условного» положения равновесия, расположенного в геометрическом центре демпфера. Расчет динамических коэффициентов производился по стандартным соотношениям [12]. На рисунке 3 представлены результаты расчета жесткости и демпфирования магнитореологического жидкостного демпфера при изменении силы тока на электромагните.

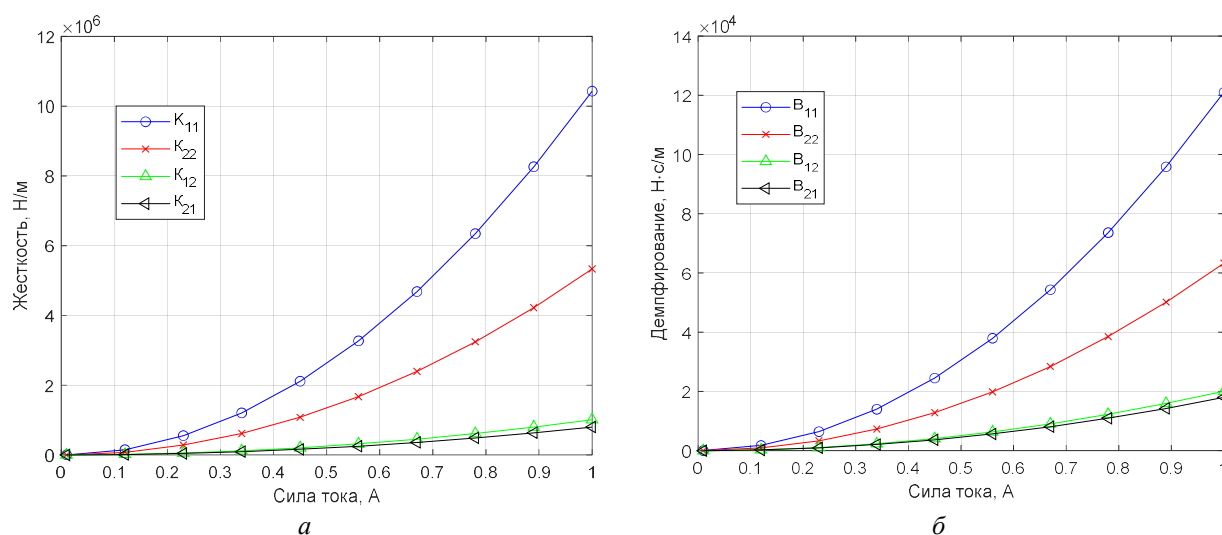


Рисунок 3 – Динамические коэффициенты МРДС: коэффициенты жесткости (а) и демпфирования (б)

### Выводы

В рамках данного исследования был проведен анализ динамики жесткого ротора на подшипниках качения, установленных в магнитореологические жидкостные демпферы сжатия. Было произведено моделирование траекторий движения неуравновешенного ротора, а также произведен анализ динамических коэффициентов жесткости и демпфирования МРДС. Данные коэффициентов жесткости и демпфирования МРДС будут использованы в составе линейной модели опорных элементов гибкого ротора на опорах жидкостного трения для моделирования нелинейных эффектов динамического поведения роторных систем.

Исследование выполнено в рамках выполнения гранта Российского научного фонда № 23-79-01218, <https://rscf.ru/project/23-79-01218>.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shaik, K., Dutta, B.K. Tuning Criteria of Nonlinear Flexible Rotor Mounted on Squeeze Film Damper Using Analytical Approach. J. Vib. Eng. Technol. 9, 325–339 (2021).-DOI: <https://doi.org/10.1007/s42417-020-00229-y>.
2. Бондаренко, М.Э. Анализ экспериментальных исследований активной комбинированной опоры ротора / М.Э. Бондаренко, Р.Н. Поляков, М.А. Токмакова, А.Д. Серебренников // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №1(357) – 2023. С.133 – 140.
3. Zhang, Yanjuan & Guo, Jiaxuan & Yang, Jianwei & Li, Xin. (2023). Recent Structural Developments and Applications of Magnetorheological Dampers (MRD): A Review. Magnetochemistry.-DOI: 9. 90. 10.3390/magnetochemistry9040090.
4. Meng, Fanxu & Zhou, Jin & Jin, Chaowu & Ji, Wentao. (2019). Modeling and experimental verification of a squeeze mode magnetorheological damper using a novel hysteresis model. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science.-DOI: 233. 095440621984290. 10.1177/0954406219842906.
5. Zapomel, Jaroslav & Ferfecki, Petr. (2012). Investigation of the vibration reduction of a flexibly supported Jeffcott rotor damped by semiactive elements working on the principle of squeezing thin layers of normal and magnetorheological oils. Institution of Mechanical Engineers - 10th International Conference on Vibrations in Rotating Machinery. - DOI: 409-418. 10.1533/9780857094537.6.409.
6. Майоров, С.В. Исследование динамики асимметричного ротора в активных комбинированных опорах / С.В. Майоров, М.Э. Бондаренко, М.А. Токмакова, В.А. Позднякова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева – № 3 (353) -2022 – С. 73-82.
7. Ferfecki, Petr & Zapomel, Jaroslav & Kozanek, Jan. (2017). Analysis of the vibration attenuation of rotors supported by magnetorheological squeeze film dampers as a multiphysical finite element problem. Advances in Engineering Software. - DOI: 104. 1-11. 10.1016/j.advengsoft.2016.11.001.
8. Zapomel, Jaroslav & Ferfecki, Petr & Kozanek, Jan. (2018). The mathematical model for analysis of attenuation of nonlinear vibration of rigid rotors influenced by electromagnetic effects. Journal of Sound and Vibration.-DOI: 443. 10.1016/j.jsv.2018.11.008.
9. Zapomel, Jaroslav & Ferfecki, Petr & Kozanek, Jan. (2021). Effect of the controllable support elements lubricated by magnetically sensitive fluids on chaotic and regular vibration of flexible rotors during rubbing. Mechanism and Machine Theory.- DOI: 155. 104096. 10.1016/j.mechmachtheory.2020.104096.

10. Wang, Jun & Liu, Yunfei & Qin, Zhaoye & Ma, Liang & Chu, Fulei. (2022). Dynamic performance of a novel integral magnetorheological damper-rotor system. Mechanical Systems and Signal Processing.-DOI: 172. 109004. 10.1016/j.ymssp.2022.109004.
11. Wang, Jun & Liu, Yunfei & Qin, Zhaoye & Ma, Liang & Chu, Fulei. (2022). Nonlinear characteristic investigation of magnetorheological damper-rotor system with local nonlinearity. Chinese Journal of Aeronautics. – DOI:36. 10.1016/j.cja.2022.06.001.
12. Бондаренко, М.Э. Комбинированный подшипниковый узел с изменяемыми жёсткостными и демпфирующими характеристиками / М.Э. Бондаренко, Р.Н. Поляков, А.В. Горин, В.А. Позднякова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №5(355) – 2022. С.51 – 58.
13. Varnusfaderani, Mahboubeh & Parizi, Mostafa & Hemmatian, Masoud & Ohadi, Abdolreza. (2022). Experimental parameters identification of a flexible rotor system equipped with smart magneto-rheological bearing. Mechatronics.-DOI: 87. 102880. 10.1016/j.mechatronics.2022.102880.
14. А.С. Фетисов Исследование магнитореологических демпферов сжатия / фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологий – 2024 - №1 (363) – 11 с.
15. Савин, Леонид Алексеевич. Моделирование роторных систем с опорами жидкостного трения / Л. А. Савин, О. В. Соломин. — Москва: Машиностроение-1, 2006. — 444 с.: ил. — Литература: с. 424-443. — ISBN 5-94275-258-3
16. Irannejad, Mostafa & Ohadi, Abdolreza. (2015). Vibration analysis of a rotor supported on magnetorheological squeeze film damper with short bearing approximation: A contrast between short and long bearing approximations. Journal of Vibration and Control. - DOI: 23. 10.1177/1077546315601298
17. Родичев, А.Ю. Исследование возможности применения искусственных нейронных сетей для диагностики роторно-опорных узлов / А.Ю. Родичев, Р.Н. Поляков, К.В. Васильев, Е.М. Минаева // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №6(356) – 2022. С.91 – 96.
18. Zapomel, Jaroslav & Ferfecki, Petr & Forte, Paola. (2017). A new mathematical model of a short magnetorheological squeeze film damper for rotordynamic applications based on a bilinear oil representation - derivation of the governing equations. Applied Mathematical Modelling.-DOI: 52. 10.1016/j.apm.2017.07.040
19. Шутин, Д.В. Управление сервоклапанами для реализации активной смазки гидростатодинамических подшипников / Д.В. Шутин, К.К. Настепанин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №3(359) – 2023. С.137 – 144.
20. Lord Corporation MRF production. MRF-122EG. //[electronic resource]. – URL: www.lord.com (date of application: 02.2024).

**Фетисов Александр Сергеевич**

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

**Левых Павел Игоревич**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел  
Студент кафедры мехатроники, механики и  
робототехники  
E-mail: levykhuser01@gmail.com

A.S. FETISOV, P.I. LEVYKH

## DYNAMIC CHARACTERISTICS OF MAGNETORHEOLOGICAL SQUEEZE DAMPERS

**Abstract.** *The article presents a mathematical model of a rotor system on rolling bearings using magnetorheological squeeze dampers. The rigid rotor model was used as the main one. The mathematical model of a squeeze damper using a magnetorheological fluid as a working fluid is based on the Reynolds equation and the Bingham rheological model. The results of a numerical solution to the problem of magnetorheological fluid flow under the action of compression forces are presented in the form of dependences of the stiffness and damping coefficients of a damper on the magnitude of the magnetic field induction.*

**Keywords:** *magnetorheological squeeze damper, Reynolds equation, mathematical model, dynamic coefficients.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Shaik, K., Dutta, B.K. Tuning Criteria of Nonlinear Flexible Rotor Mounted on Squeeze Film Damper Using Analytical Approach. J. Vib. Eng. Technol. 9, 325–339 (2021).-DOI: <https://doi.org/10.1007/s42417-020-00229-y>.
2. Bondarenko, M.E. Analysis of experimental studies of active combined rotor support / M.E. Bondarenko, R.N. Polyakov, M.A. Tokmakova, A.D. Serebrennikov // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 1 (357) – 2023. P. 133 – 140.

3. Zhang, Yanjuan & Guo, Jiaxuan & Yang, Jianwei & Li, Xin. (2023). Recent Structural Developments and Applications of Magnetorheological Dampers (MRD): A Review. *Magnetochemistry*.-DOI: 9. 90. 10.3390/magnetochemistry9040090.
4. Meng, Fanxu & Zhou, Jin & Jin, Chaowu & Ji, Wentao. (2019). Modeling and experimental verification of a squeeze mode magnetorheological damper using a novel hysteresis model. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*.-DOI: 233. 095440621984290. 10.1177/0954406219842906.
5. Zapomel, Jaroslav & Ferfecki, Petr. (2012). Investigation of the vibration reduction of a flexibly supported Jeffcott rotor damped by semiactive elements working on the principle of squeezing thin layers of normal and magnetorheological oils. *Institution of Mechanical Engineers - 10th International Conference on Vibrations in Rotating Machinery*. - DOI: 409-418. 10.1533/9780857094537.6.409.
6. Mayorov S.V. Study of the dynamics of an asymmetric rotor in active combined supports / S.V. Mayorov, M.E. Bondarenko, M.A. Tokmakova, V.A. Pozdnyakova // *Fundamental and applied problems of engineering and technology*. – Orel: OSU named after I.S. Turgenev – No. 3 (353) 2022 – P. 73-82.
7. Ferfecki, Petr & Zapomel, Jaroslav & Kozanek, Jan. (2017). Analysis of the vibration attenuation of rotors supported by magnetorheological squeeze film dampers as a multiphysical finite element problem. *Advances in Engineering Software*. - DOI: 104. 1-11. 10.1016/j.advengsoft.2016.11.001.
8. Zapomel, Jaroslav & Ferfecki, Petr & Kozanek, Jan. (2018). The mathematical model for analysis of attenuation of nonlinear vibration of rigid rotors influenced by electromagnetic effects. *Journal of Sound and Vibration*.-DOI: 443. 10.1016/j.jsv.2018.11.008.
9. Zapomel, Jaroslav & Ferfecki, Petr & Kozanek, Jan. (2021). Effect of the controllable support elements lubricated by magnetically sensitive fluids on chaotic and regular vibration of flexible rotors during rubbing. *Mechanism and Machine Theory*.- DOI: 155. 104096. 10.1016/j.mechmachtheory.2020.104096.
10. Wang, Jun & Liu, Yunfei & Qin, Zhaoye & Ma, Liang & Chu, Fulei. (2022). Dynamic performance of a novel integral magnetorheological damper-rotor system. *Mechanical Systems and Signal Processing*.-DOI: 172. 109004. 10.1016/j.ymssp.2022.109004.
11. Wang, Jun & Liu, Yunfei & Qin, Zhaoye & Ma, Liang & Chu, Fulei. (2022). Nonlinear characteristic investigation of magnetorheological damper-rotor system with local nonlinearity. *Chinese Journal of Aeronautics*. – DOI:36. 10.1016/j.cja.2022.06.001.
12. Bondarenko, M.E. Combined bearing unit with variable rigidity and damping characteristics / M.E. Bondarenko, R.N. Polyakov, A.V. Gorin, V.A. Pozdnyakova // *Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 5 (355) – 2022. P. 51 – 58.*
13. Varnusfaderani, Mahboubeh & Parizi, Mostafa & Hemmatian, Masoud & Ohadi, Abdolreza. (2022). Experimental parameters identification of a flexible rotor system equipped with smart magneto-rheological bearing. *Mechatronics*.-DOI: 87. 102880. 10.1016/j.mechatronics.2022.102880.
14. A.S. Fetisov Investigation of magnetorheological compression dampers / fundamental and applied problems of engineering and technology – 2024 - №1 (363) – 11 p.
15. Savin, Leonid Alekseevich. Modeling of rotary systems with liquid friction supports / L. A. Savin, O. V. Solomin. — Moscow: Mashinostroenie-1, 2006. — 444 p.: ill. — Literature: pp. 424-443. — ISBN 5-94275-258-3
16. Irannejad, Mostafa & Ohadi, Abdolreza. (2015). Vibration analysis of a rotor supported on magnetorheological squeeze film damper with short bearing approximation: A contrast between short and long bearing approximations. *Journal of Vibration and Control*. - DOI: 23. 10.1177/1077546315601298
17. Rodichev, A.Yu. Study of the possibility of using artificial neural networks for the diagnosis of rotor-support units / A.Yu. Rodichev, R.N. Polyakov, K.V. Vasiliev, E.M. Minaeva // *Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 6 (356) – 2022. P. 91 – 96*
18. Zapomel, Jaroslav & Ferfecki, Petr & Forte, Paola. (2017). A new mathematical model of a short magnetorheological squeeze film damper for rotordynamic applications based on a bilinear oil representation - derivation of the governing equations. *Applied Mathematical Modelling*.-DOI: 52. 10.1016/j.apm.2017.07.040
19. Shutin, D.V. Control of servo valves for the implementation of active lubrication of hydrodynamic bearings / D.V. Shutin, K.K. Nastepanin // *Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 3 (359) – 2023. P. 137 – 144.*
20. Lord Corporation MRF production. MRF-122EG. // [electronic resource]. – URL: [www.lord.com](http://www.lord.com) (date of application: 02.2024).

**Fetisov Alexander Sergeevich**

Orel State University,  
Assistant of the Department of Mechatronics, Mechanics  
and Robotics  
E-mail: [fetisov57rus@mail.ru](mailto:fetisov57rus@mail.ru)

**Levykh Pavel Igorevich**

Orel State University,  
Student of the Department of Mechatronics, Mechanics  
and Robotics  
E-mail: [levykhuser01@gmail.com](mailto:levykhuser01@gmail.com)

© А.С. Фетисов, П.И. Левых, 2024

А.Ю. РОДИЧЕВ, А.В. ГОРИН

## ИССЛЕДОВАНИЕ И ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ С АНТИФРИКЦИОННЫМ ТВЕРДОСМАЗОЧНЫМ ПОКРЫТИЕМ В ПРОЦЕССЕ ПРИРАБОТКИ

**Аннотация.** В статье представлены исследование и оценка процесса приработки твердосмазочного антифрикционного покрытия в подшипнике скольжения. Приведен краткий анализ применяемых твердосмазочных покрытий. Рассмотрен экспериментальный стенд для исследования процесса притирки твердосмазочных антифрикционных покрытий в подшипниковых узлах скольжения. Дано описание измерений значений шероховатости притираемой поверхности с помощью профилометра MarSurf PS10. Представлены полученные зависимости изменения частоты вращения ротора от времени для различных антифрикционных твердосмазочных покрытий. Даны выводы и рекомендации по дальнейшему применению антифрикционных твердосмазочных покрытий в узлах трения.

**Ключевые слова:** оценка, исследование, подшипник скольжения, твердосмазочное покрытие, выбег, эксперимент.

### Введение

Для уменьшения механических потерь и увеличения износостойкости деталей, узлов и агрегатов, функционирующих при любом виде трения (сухом, граничном, жидкостном), широко используют твердые смазочные материалы в форме тонких покрытий. Такие покрытия обычно состоят из связующего вещества на основе синтетических смол и одного или нескольких антифрикционных элементов, чаще всего - графита и дисульфида молибдена. Именно связующее вещество определяет основные эксплуатационные качества покрытия и температурный диапазон его использования, хотя само по себе оно не участвует в процессе смазывания [1, 2, 3]. Применение твердосмазочных покрытий диктуется необходимостью работы узлов и агрегатов транспортных средств при повышенных нагрузках, а также стремлением снизить материалоемкость и потери на механическое трение с помощью их применения [4, 5, 6]. Ярким примером этому могут служить твердосмазочные покрытия на поверхностях вкладышей подшипников скольжения, юбок поршней в двигателях внутреннего сгорания, а также на деталях цилиндропоршневых групп компрессоров и других видов оборудования [7-11]. Известно, что крупнейшие мировые производители подшипников (Federal-Mogul, Mahle, King Bearings), активно разрабатывают и выпускают вкладыши подшипников коленчатого вала с твердосмазочными покрытиями для двигателей различных типов, включая легковые и грузовые автомобили.

В настоящее время на рынке представлен широкий ассортимент твердосмазочных покрытий зарубежного и отечественного производства, из всего многообразия можно выделить наиболее распространенные, такие как: Molykote (Германия), Grafal MAHLE, (Германия), MODENGY (РФ), ВМП Авто (РФ). При этом, стоит отметить, что качество отечественных твердосмазочных покрытий не уступает зарубежным, а иногда и превосходит, также не маловажным является показатель «цена - качество», так как отечественные покрытия имеют более доступную цену, широкую номенклатуру и могут быть приобретены в минимальные сроки, что немаловажно при политике применения санкций против нашей страны.

### Основная часть

Исследования влияния твердосмазочных покрытий на работу узлов трения в основном носят экспериментальный характер [12-14]. При их проведении было установлено, что современные твердосмазочные материалы, содержащие органические или комплексные соединения, имеют высокие триботехнические характеристики. Коэффициент трения при использовании твердосмазочных покрытий может колебаться от 0,004 до 0,03, а нижний предел этого диапазона близок к минимальному значению коэффициента трения, как при использовании жидкой смазки [15].

Известны экспериментальные исследования [16] по изучению топографии, структуры и свойств поверхностей с покрытиями из дисульфида молибдена на разных стадиях износа. Эксперименты проводились с использованием машины трения, в результате которых были получены графики зависимости износа и коэффициента трения от параметра, определяющего износ. В ходе проведения исследований учеными были выделены четыре стадии износа твердосмазочных покрытий. Особый интерес представляют данные, полученные Сутягиным О. В. и его коллегами, по характеристикам микрогеометрии образцов с твердосмазочным покрытием и без, на разных этапах тестирования. В процессе испытаний было установлено, что параметры микрогеометрии образцов изменяются из-за износа и формирования слоя переноса. В частности, значение параметра  $R_a$  для образцов без твердосмазочного покрытия уменьшается вдвое, а для образцов с твердосмазочным покрытием - более чем в пять раз.

Как уже было сказано выше, большинство исследований твердосмазочных покрытий проводится по стандартным методикам, которые не всегда отражают фактические возможности покрытий данного вида и не дают представления о формировании рабочей поверхности трения в процессе их эксплуатации, в частности, о режимах приработки покрытий такого вида [17, 18].

Для проведения исследования нами была разработана экспериментальная установка (рисунок 1), которая имеет в своем составе: два разъемных подшипниковых узла скольжения; возможность подавать смазочный материал непосредственно в каждый из узлов скольжения; асинхронный электродвигатель АИР 63А4 установленный на основании, который соединён с валом экспериментальной установки через эластичную муфту.

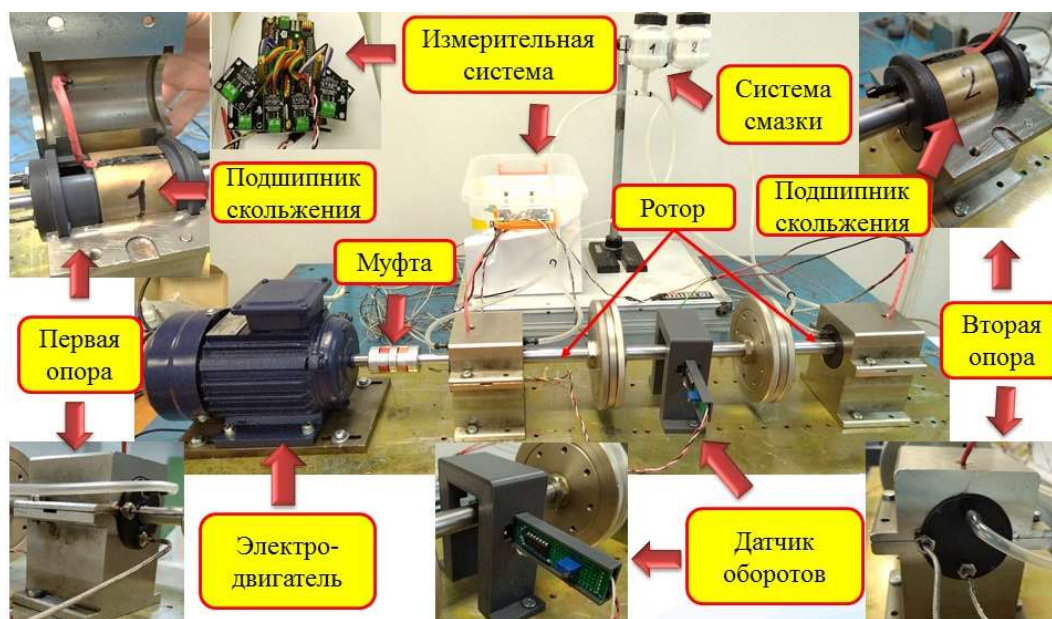


Рисунок 1 – Структурная схема экспериментальной установки

На основании экспериментальной установки расположена стойка с датчиком частоты вращения вала. Каждый из опорных подшипниковых узлов скольжения состоит из: корпуса, верхней, правой и левой крышки, а также установленного между ними исследуемого нами подшипника скольжения. Для предотвращения течи масла между валом и крышками в конструкции крышек предусмотрена установка манжет (сальников): WLR TC 17x26x7 и WLR TC 12x25x5. Для подачи смазочного материала в подшипниковые узлы в левой и правой крышке предусмотрены отверстия куда устанавливаются жиклеры, а также предусмотрены резьбовые отверстия для установки датчиков температуры. Для каждого подшипникового узла используется отдельная емкость со смазочным материалом. Экспериментальная установка имеет свою контроль-измерительную систему, которая получает, обрабатывает и сохраняет



информацию о состоянии подшипниковых узлов скольжения и режимах работы экспериментальной установки в каждый момент времени [19-21].

Для определения поведения твердосмазочного покрытия, в условиях эксплуатации, на рабочей поверхности подшипника скольжения нами было принято решение по проведению серии экспериментов с подшипниками скольжения (рисунок 2), изготовленными по разным технологиям и с применением различных материалов:

1. Подшипники скольжения, изготовленные из бронзы;
2. Подшипники скольжения, изготовленные из бронзы, с нанесенным твердосмазочным покрытием фирмы Molykote (Германия);
3. Подшипники скольжения, изготовленные из бронзы, с нанесенным твердосмазочным покрытием фирмы MODENGY (РФ).

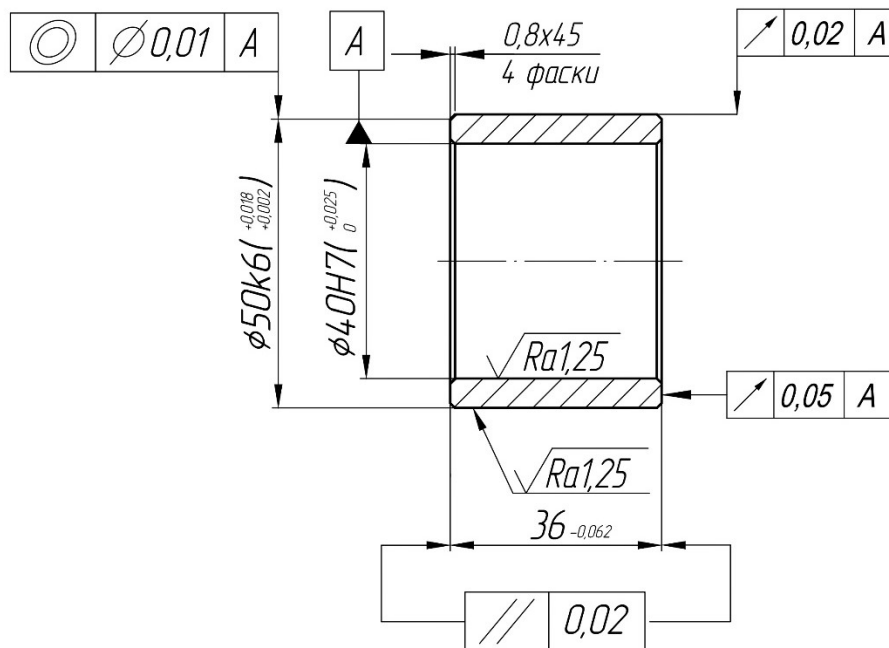


Рисунок 2 – Эскиз подшипника скольжения

Для проведения экспериментальных исследований были изготовлены девять подшипников скольжения по три каждого вида.

Исследование параметров шероховатости, изготовленных образцов, проводили на профилометре MarSurf PS10 (рисунок 3).



Рисунок 3 – Измерение шероховатости подшипника скольжения на профилометре MarSurf PS10

Порядок проведения экспериментальных исследований [22] включал следующие этапы:



первый этап - разгон ротора до 1400... 1500 об/мин с помощью электродвигателя;  
 второй этап – выдерживание работы экспериментальной установки с частотой вращения ротора 1400... 1500 об/мин в течении трех минут;  
 третий этап – остановка электродвигателя;  
 четвертый этап – выбег ротора до полной остановки, под действием сил инерции и сил трения в подшипниковых узлах скольжения.

В качестве смазочного материала использовалось масло И-20А. В течение времени проведения эксперимента с заданным шагом в разработанном программном обеспечении фиксировались показания датчика частоты вращения. Результаты эксперимента в графическом виде представляют собой кривую выбега ротора. Кроме того, разработанным программным обеспечением предусмотрен экспорт данных в текстовый файл, для удобства дальнейшей обработки данных.

В ходе проведения эксперимента было сделано по 60 пусков – остановов экспериментальной установки для каждого из девяти исследуемых подшипников скольжения. После анализа результатов были выделены наиболее значимые показатели, которые позволяют описать процесс приработки рабочей поверхности скольжения с высокой точностью. Также важно отметить, что на разных стадиях приработки образцы с покрытием и без ведут себя по-разному, что необходимо учитывать при разработке новых покрытий и методов их нанесения.

Результаты экспериментальных исследований с образцами подшипников скольжения изготовленных из бронзы представлены на рисунке 4 и рисунке 5.

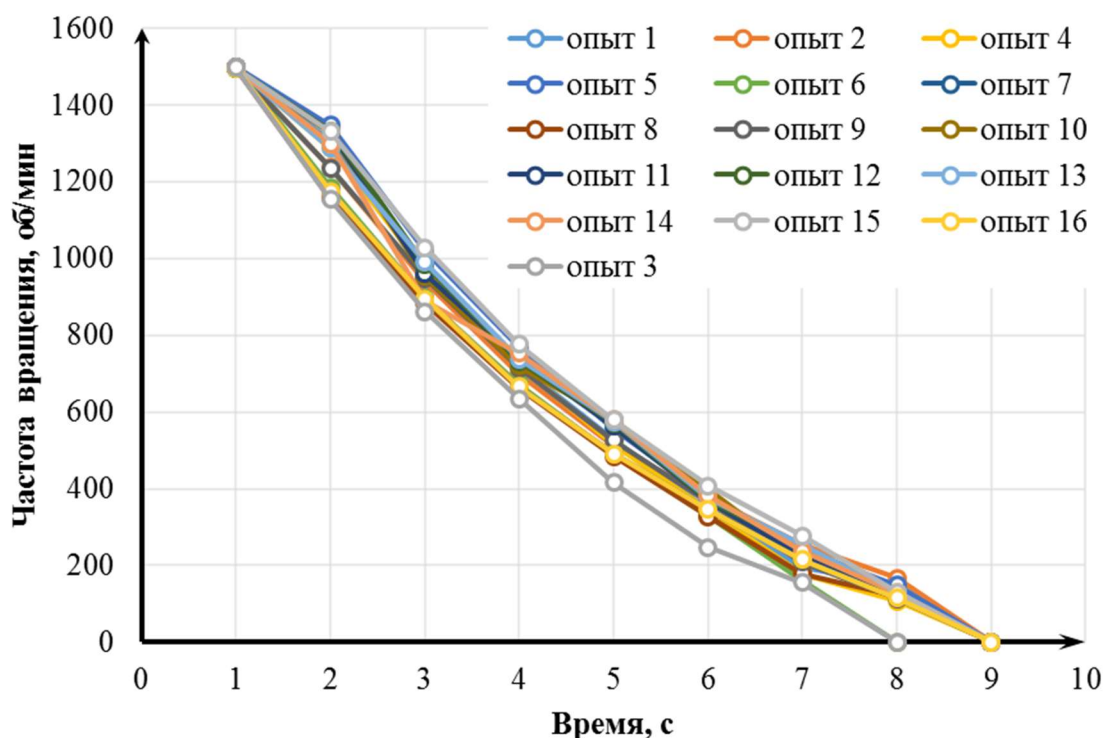


Рисунок 4 – Изменение частоты вращения ротора от времени (материал – бронза)

Эксперимент с одним комплектом втулок проходил непрерывно в течении трех часов (180 минут чистого времени) было совершено 60 пусков-остановов электродвигателя. Выбег после остановки электродвигателя составил в течение первой фазы эксперимента (20 пусков-остановов) 8 секунд, во второй фазе эксперимента (20 пусков-остановов) от 8 до 9 секунд и в третий фазе эксперимента (20 пусков-остановов) 9 секунд, при этом параметры шероховатости поверхности втулки практически не изменились. Риски, сколы и другие элементы износа на поверхности исследуемых подшипников скольжения обнаружены небыли.



Рисунок 5 – Параметры шероховатости подшипника скольжения (материал – бронза)

Результаты экспериментальных исследований с образцами подшипников скольжения изготовленных с использованием твердого антифрикционного покрытия Molykote представлены на рисунке 6 и рисунке 7.

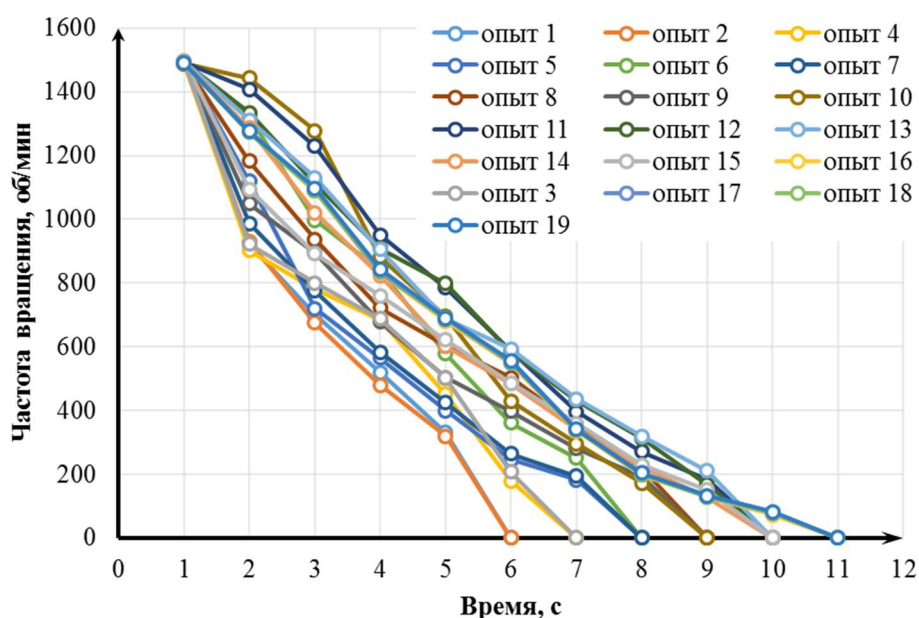


Рисунок 6 – Изменение частоты вращения ротора от времени (материал – Molykote)

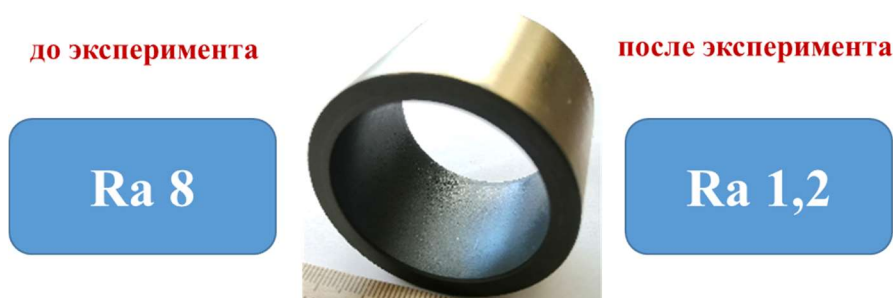


Рисунок 7 – Параметры шероховатости подшипника скольжения (материал – Molykote)

Эксперимент с одним комплектом втулок проходил непрерывно в течении трех часов (180 минут чистого времени) было совершено 60 пусков-остановов электродвигателя. Выбег после остановки электродвигателя составил в течение первой фазы эксперимента (20 пусков-остановов) от 6 до 7 секунд, во второй фазе эксперимента (20 пусков-остановов) от 7 до 10 секунд и в третий фазе эксперимента (20 пусков-остановов) от 10 до 11 секунд, при этом параметры шероховатости поверхности втулки практически значительно изменились от  $Ra=8$

мкм в начале эксперимента до  $Ra=1,2$  мкм в его конце. Риски, сколы и другие элементы износа на поверхности исследуемых подшипников скольжения обнаружены небыли.

Результаты экспериментальных исследований с образцами подшипников скольжения изготовленных с использованием твердого антифрикционного покрытия MODENGY представлены на рисунке 8 и рисунке 9.

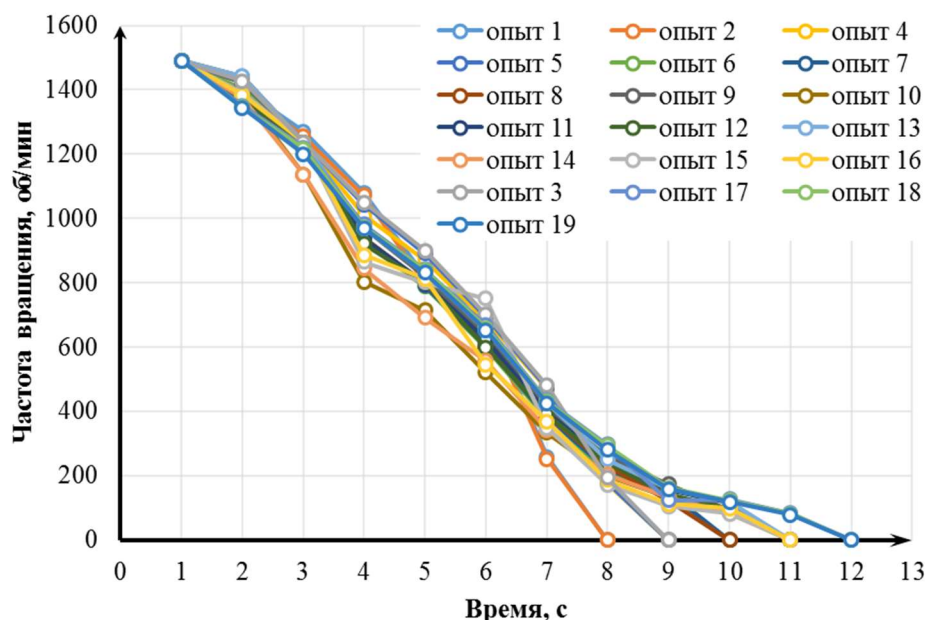


Рисунок 8 – Изменение частоты вращения ротора от времени (материал – MODENGY)



Рисунок 9 – Параметры шероховатости подшипника скольжения (материал – MODENGY)

Эксперимент с одним комплектом втулок проходил непрерывно в течении трех часов (180 минут чистого времени) было совершено 60 пусков-остановов электродвигателя. Выбег после остановки электродвигателя составил в течение первой фазы эксперимента (20 пусков-остановов) от 8 до 9 секунд, во второй фазе эксперимента (20 пусков-остановов) от 9 до 11 секунд и в третий фазе эксперимента (20 пусков-остановов) от 11 до 12 секунд, при этом параметры шероховатости поверхности втулки практически значительно изменились от  $Ra=8...11$  мкм в начале эксперимента до  $Ra=1...1,2$  мкм в его конце. Риски, сколы и другие элементы износа на поверхности исследуемых подшипников скольжения обнаружены небыли.

По результатам, полученным в ходе эксперимента, проведем аппроксимацию полученных значений и построим графики выбега ротора в подшипниках скольжения, которые были изготовлены с использованием твердого антифрикционного покрытия и без него (рисунок 10).

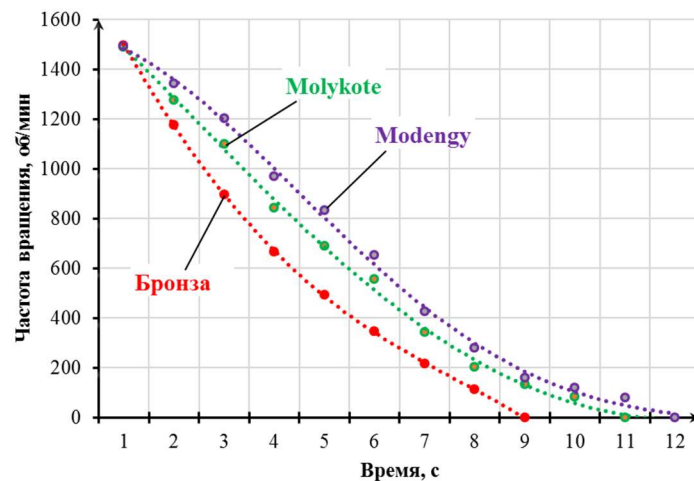


Рисунок 10 – Графики вы бега ротора в подшипниках скольжения

### Выводы

На основе результатов проведённых исследований процесса приработки антифрикционных твердосмазочных покрытий в процессе эксплуатации подшипников скольжения можно сделать следующие выводы:

1. Для длительного использования подшипников скольжения с антифрикционным твердосмазочным покрытием необходимо применять процесс приработки поверхности.
2. Процесс приработки покрытий может быть ускорен за счет правильного выбора параметров эксплуатации, таких как скорость скольжения, нагрузка и температура.
3. Изменение частоты вращения ротора от времени показывает, что вы бег существенно увеличивается при применении антифрикционных твердосмазочных покрытий, косвенным образом показывая уменьшение коэффициента трения.
4. Наиболее эффективным является в представленном случае является антифрикционное твердосмазочное покрытие производителя MODENGY.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брейтуэйт, Е.Р. Твердые смазочные материалы и антифрикционные покрытия. – М.: Химия, 1967. – 320 с.
2. Буяновский, И.А. Граничная смазка // В кн. «Современная трибология: итоги и перспективы» / Под ред. К.В. Фролова. – М.: Изд-во ЛКИ. – 2008, 226-278.
3. Буяновский, И.А. Граничная смазка адсорбционным слоем // Трение и износ. – 2010. – Т. 31. – № 1. – С. 48-67.
4. Радин Ю.А., Суслов П.Г. Безызносность деталей машин при трении. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. – 229 с.
5. Трибология. Состояние и перспективы: сборник научных трудов. В 4-х томах. Главные редакторы И.Г. Горячева и М.А. Бронец. Т.2. Смазка и смазочные материалы / под ред. С.М. Захарова и И.А. Буяновского. – Уфа: РИК УГАТУ, 2019. – 504 с.
6. Венцель С.В., Лелюк В.А. Результаты исследования приработки пар трения. – В сб.: Теория смазочного действия и новые материалы, М.: Наука, 1965, с. 81-85.
7. Бондаренко, М.Э. Анализ экспериментальных исследований активной комбинированной опоры ротора / М.Э. Бондаренко, Р.Н. Поляков, М.А. Токмакова, А.Д. Серебренников // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №1(357) – 2023. С.133 – 140.
8. Бондаренко, М.Э. Комбинированный подшипниковый узел с изменяемыми жёсткостными и демпфирующими характеристиками / М.Э. Бондаренко, Р.Н. Поляков, А.В. Горин, В.А. Позднякова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №5(355) – 2022. С.51 – 58.
9. Сытин, А.В. Расчет характеристик упорного лепесткового газодинамического подшипника совместным решением задач газодинамики и теории упругости / А.В. Сытин, С.А. Власова, А.Д. Серебренников, К.В. Смирнова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №5(361) – 2023. С.72 – 80.
10. Фетисов, А.С. Экспериментальный анализ точности определения положения ротора в опорах жидкостного трения / А.С. Фетисов, Д.В. Шутин, М.Н. Сметанин, К.К. Настепанин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №6(356) – 2022. С.83 – 91.

11. Пронин, М.Д. Снижение механических потерь совершенствованием конструкции поршня быстроходного дизеля: автореферат дис. ... канд. техн. наук/ М.Д. Пронин. – Москва. – 2009. – 18 с.
12. Сутягин, О.В. Научные основы инженерных методов проектирования три-ботехнических систем с твердосмазочными покрытиями: автореферат дис. ... д-ра. техн. наук/ О.В. Сутягин. – Тверь. – 2015. – 39 с.
13. Сытин, А.В. Расчет характеристик радиального лепесткового газодинамического подшипника с изменяемой геометрией опорной поверхности / А.В. Сытин, С.А. Власова, И.А. Серенко, А.Д. Серебренников // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №6(362) – 2023. С.108 – 116.
14. Криони, Н.К. Повышение работоспособности по триботехническим параметрам высокотемпературных подвижных сопряжений с твердыми покрытиями: автореферат дис. ... д-ра. техн. наук/ Н.К. Криони. – Москва. – 2005.
15. Шутин, Д.В. Управление сервоклапанами для реализации активной смазки гидростатодинамических подшипников / Д.В. Шутин, К.К. Настепанин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №3(359) – 2023. С.137 – 144.
16. Эволюция твердосмазочных покрытий, содержащих дисульфид молибдена, в процессе изнашивания / О.В. Сутягин, А.Н. Болотов, В.В. Мешков, Д.А. Зоренко, М.В. Васильев // Трение и смазка в машинах и механизмах. № 12. – 2013. С. 37-48.
17. Шутин, Д.В. Анализ точности показаний датчиков перемещений при определении положения ротора в опорах жидкостного трения / Д.В. Шутин, А.С. Фетисов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №3(353) – 2022. С.103 – 110.
18. Авдонькин, Ф.Н. Изменение технического состояния автомобиля в процессе эксплуатации. – Саратов: СГУ им. Н.Г. Чернышевского, 1973. – 191 с.
19. Пат. 2783323 Российская Федерация, F16C 33/04, F16C 33/12. Способ изготовления подшипника скольжения с возможностью диагностики предельного изнашивания рабочей поверхности / Родичев А.Ю., Поляков Р.Н., Горин А.В., Родичева И.В., Фетисов А.С. (ОГУ им. И.С.Тургенева). - №2022114024; Заявл. 24.05.22; Опубл. 11.11.22, Бюл. №32. - 8 с.
20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2022618435 Российская Федерация. Программа мониторинга состояния подшипника скольжения в реальном времени и предиктивной диагностики предельного изнашивания рабочей поверхности / Родичев А.Ю., Поляков Р.Н., Настепанин К.К., Попов С.Г., Родичева И.В. (ФГБОУ ВО ОГУ имени И.С. Тургенева). - №2022617494; Заявл. 25.04.22; Опубл. 06.05.22. – 1
21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2022663479 Российская Федерация. Прошивка контроллера «Arduino» для мониторинга состояния подшипников скольжения в реальном времени / Родичев А.Ю., Поляков Р.Н., Настепанин К.К., Горин А.В., Родичева И.В., Стебаков И.Н. (ФГБОУ ВО ОГУ имени И.С. Тургенева). - №2022662064; Заявл. 27.06.22; Опубл. 14.07.22.
22. Влияние нанодобавок на трибологические и динамические свойства смазки подшипников / А.В. Корнаев, А.В. Чичварин, В.П. Смирнов, Е.П. Корнаева, В.И. Лебединский, М.С. Ноздричкин // Мир транспорта и технологических машин. № 4 (47). 2014. С. 18 — 26.

**Родичев Алексей Юрьевич**

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

A.Yu. RODICHEV, A.V. GORIN

## RESEARCH AND ASSESSMENT OF THE TECHNICAL CONDITION OF SLIDING BEARINGS WITH ANTI-FRICTION SOLID-LUBRICANT COATING DURING THE BREAKING-IN PROCESS

**Abstract.** *The article presents a study and evaluation of the running-in process of a solid lubricant antifriction coating in a plain bearing. A brief analysis of the solid lubricant coatings used is provided. An experimental stand is considered for studying the grinding process of solid lubricant antifriction coatings in sliding bearing units. A description is given of measuring the roughness values of the ground surface using the MarSurf PS10 profilometer. The obtained dependences of the change in rotor speed on time for various antifriction solid lubricant coatings are presented. Conclusions and recommendations for the further use of antifriction solid lubricant coatings in friction units are given.*

**Keywords:** *assessment, research, plain bearing, solid lubricant coating, run-out, experiment.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Braithwaite, E.R. Solid lubricants and anti-friction coatings. – М.: Chemistry, 1967. – 320 p.

2. Buyanovsky, I.A. Boundary lubrication // In the book. "Modern tribology: results and prospects" / Ed. K.V. Frolova. – M.: Publishing house LKI. – 2008, 226-278.
3. Buyanovsky, I.A. Boundary lubrication by an adsorption layer // Friction and wear. – 2010. – T. 31. – No. 1. – P.48-67.
4. Radin Yu.A., Suslov P.G. Wearlessness of machine parts due to friction. – L.: Mechanical engineering. Leningr. department, 1989. – 229 p.
5. Tribology. Status and prospects: collection of scientific papers. In 4 volumes. Chief editors I.G. Goryachev and M.A. Bronovets. T.2. Lubrication and lubricants / ed. CM. Zakharov and I.A. Buyanovsky. – Ufa: RIK UGATU, 2019. – 504 p.
6. Venzel S.V., Lelyuk V.A. Results of the study of running-in friction pairs. – In the collection: Theory of lubrication action and new materials, M.: Nauka, 1965, p. 81-85.
7. Bondarenko, M.E. Analysis of experimental studies of active combined rotor support / M.E. Bondarenko, R.N. Polyakov, M.A. Tokmakova, A.D. Serebrennikov // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 1 (357) – 2023. P. 133 – 140.
8. Bondarenko, M.E. Combined bearing unit with variable rigidity and damping characteristics / M.E. Bondarenko, R.N. Polyakov, A.V. Gorin, V.A. Pozdnyakova // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 5 (355) – 2022. P. 51 – 58.
9. Sytin, A.V. Calculation of characteristics of a thrust petal gas-dynamic bearing by joint solution of problems of gas dynamics and elasticity theory / A.V. Sytin, S.A. Vlasova, A.D. Serebrennikov, K.V. Smirnova // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 5 (361) – 2023. P. 72 – 80.
10. Fetisov, A.S. Experimental analysis of the accuracy of determining the rotor position in fluid friction supports / A.S. Fetisov, D.V. Shutin, M.N. Smetanin, K.K. Nastepanin // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 6 (356) – 2022. P. 83 – 91.
11. Pronin, M.D. Reducing mechanical losses by improving the design of a high-speed diesel piston: abstract of thesis....cand. tech. Sciences / M.D. Pronin. - Moscow. – 2009. – 18 p.
12. Sutyagin, O.V. Scientific foundations of engineering methods for designing tri-technical systems with solid lubricant coatings: abstract of thesis.... dr. tech. Sciences/ O.V. Sutyagin. - Tver. – 2015. – 39 p.
13. Sytin, A.V. Calculation of characteristics of a radial petal gas-dynamic bearing with variable geometry of the supporting surface / A.V. Sytin, S.A. Vlasova, I.A. Serenko, A.D. Serebrennikov // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 6 (362) – 2023. P. 108 – 116.
14. Krioni, N.K. Increasing the performance of high-temperature moving joints with hard coatings in terms of tribotechnical parameters: abstract of the thesis.... dr. tech. Sciences/ N.K. Kryoni. - Moscow. – 2005.
15. Shutin, D.V. Control of servo valves for the implementation of active lubrication of hydrodynamic bearings / D.V. Shutin, K.K. Nastepanin // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 3 (359) – 2023. P. 137 – 144.
16. Evolution of solid lubricant coatings containing molybdenum disulfide during wear / O.V. Sutyagin, A.N. Bolotov, V.V., Meshkov, D.A. Zorenko, M.V. Vasiliev // Friction and lubrication in machines and mechanisms. No. 12. – 2013. pp. 37-48.
17. Shutin, D.V. Analysis of the accuracy of displacement sensor readings when determining the position of the rotor in fluid friction supports / D.V. Shutin, A.S. Fetisov // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 3 (353) – 2022. P. 103 – 110.
18. Avdonkin, F.N. Changes in the technical condition of the vehicle during operation. – Saratov: SSU im. N.G. Chernyshevsky, 1973. – 191 p.
19. Pat. 2783323 Russian Federation, F16C 33/04, F16C 33/12. Method for manufacturing a sliding bearing with the ability to diagnose the maximum wear of the working surface / Rodichev A.Yu., Polyakov R.N., Gorin A.V., Rodicheva I.V., Fetisov A.S. (OSU named after I.S. Turgenev). - No. 2022114024; Application 05/24/22; Publ. 11.11.22, Bulletin. No. 32. - 8 s.
20. Certificate of state registration of a computer program 2022618435 Russian Federation. Program for monitoring the condition of a sliding bearing in real time and predictive diagnostics of the maximum wear of the working surface / Rodichev A.Yu., Polyakov R.N., Nastepanin K.K., Popov S.G., Rodicheva I.V. (FSBEI HE OSU named after I.S. Turgenev). - No. 2022617494; Application 04/25/22; Publ. 05/06/22. - 1
21. Certificate of state registration of a computer program 2022663479 Russian Federation. Firmware for the Arduino controller for monitoring the condition of sliding bearings in real time / Rodichev A.Yu., Polyakov R.N., Nastepanin K.K., Gorin A.V., Rodicheva I.V., Stebakov I.N. (FSBEI HE OSU named after I.S. Turgenev). - No. 2022662064.
22. The influence of nanoadditives on the tribological and dynamic properties of bearing lubrication / A.V. Kornaevev, A.V. Chichvarin, V.P. Smirnov, E.P. Kornaeveva, V.I. Lebedinsky, M.S. Nozdrihkin // World of transport and technological machines. No. 4 (47). 2014. pp. 18 – 26.

**Rodichev Aleksey Yrievich**

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

**Gorin Andrei Vladimirovich**

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



А.В. ГОРИН, Р.Н. ПОЛЯКОВ, А.В. ВНУКОВ, И.В. РОДИЧЕВА, В.Ю. ПРЕСНЕЦОВА

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ БЕСКОНТАКТНЫХ УПЛОТНЕНИЙ В РОТОРНО-ОПОРНЫХ УЗЛАХ

**Аннотация.** В статье рассматривается вопрос исследования технического состояния бесконтактных уплотнений роторно-опорных узлов. Описывается экспериментальная установка включающая в себя бесконтактные уплотнения. Выполнено проектирование пневматической схемы подачи сжатого воздуха в экспериментальный модуль. Показаны результаты экспериментальных и теоретических исследований технического состояния бесконтактных уплотнений. Представлен график сравнения полученных результатов. Предложены выводы и рекомендации по применению бесконтактных уплотнений в роторно-опорных узлах.

**Ключевые слова:** бесконтактное уплотнение, подшипник, эксперимент, погрешность, параметр, достоверность, давление.

### Введение

Уплотнительный узел является одним из важных элементов роторной машины, который помимо своей основной функции вносит вклад в грузоподъемность и динамические характеристики. Эксплуатационные параметры таких машин как насосы, компрессоры, детандеры во многом зависят от эффективности работы применяемых уплотнений. Основными направлениями развития уплотнительной техники является повышение перепадов давления на входе и выходе уплотнения, обеспечения заданного ресурса, минимального влияния на динамическую устойчивость [1,2].

При продолжительном использовании уплотнения происходит износ его элементов при этом увеличивается величина паразитной утечки. Негативно сказывающаяся на удельную тягу газотурбинного двигателя и удельный расход топлива. Так как из-за геометрических погрешностей при изготовлении уплотнительных узлов и элементов конструкций, непосредственно связанных с ними в процессе эксплуатации возможны силовые, кинематические и другие возмущения, влияющие на величину зазора. Необходимо уменьшить величину паразитной утечки при этом обеспечить наименьший радиальный зазор между вращающимися и неподвижными элементами конструкции [3, 4]. Уменьшение радиального зазора приводит к увеличению динамической силы уплотняемой среды проходящей из области высокого давления в область низкого давления, через бесконтактное уплотнение, воздействуя на податливые элементы уплотнительного узла, вызывая отгибания этих элементов. Поэтому так же необходимо обеспечить распределение давления в зонах повышенного и пониженного давления, в которых установлены бесконтактные уплотнения. Для поддержания рабочего зазора, при котором обеспечивается требуемая герметичность необходимо иметь возможность анализировать влияния различных характеристик на удельную величину утечки уплотнительного узла [5-7].

Поиски силовых, кинематических и тепловых зависимостей удовлетворяющих эксплуатационным показателям уплотнительного узла приводит к проектированию новых конструкций бесконтактных уплотнений с саморегулирующимися элементами позволяющими подстраиваться под режимы работы уплотняемой среды [8,9].

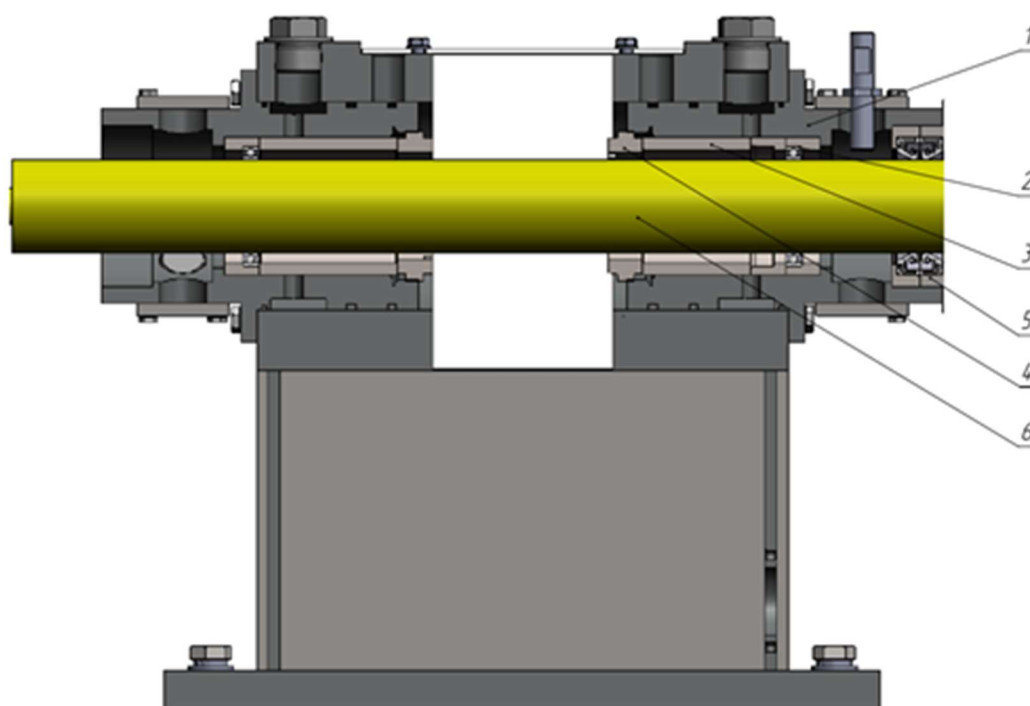
### Основная часть

Уплотнительный узел (модуль) экспериментальной установки и информационно-измерительная система для исследования влияния расходно-напорных характеристик бесконтактного пальчикового уплотнения была описана в работе [8].

Данный узел интегрирован в испытательную установку для исследования течений в коническо-цилиндрических каналах. В данной установке в корпусе подшипникового узла (1) вместо подшипников скольжения установлены подшипники качения (2), зафиксированные дистанционной втулкой (3) скрепляемых гайкой (4). Дополнительно установлено дистанционное кольцо с манжетным уплотнением (5) для предотвращения утечки рабочей



среды. Испытательная установка, в которую интегрируется экспериментальный уплотнительный узел (модуль) представлен на рисунке 1.



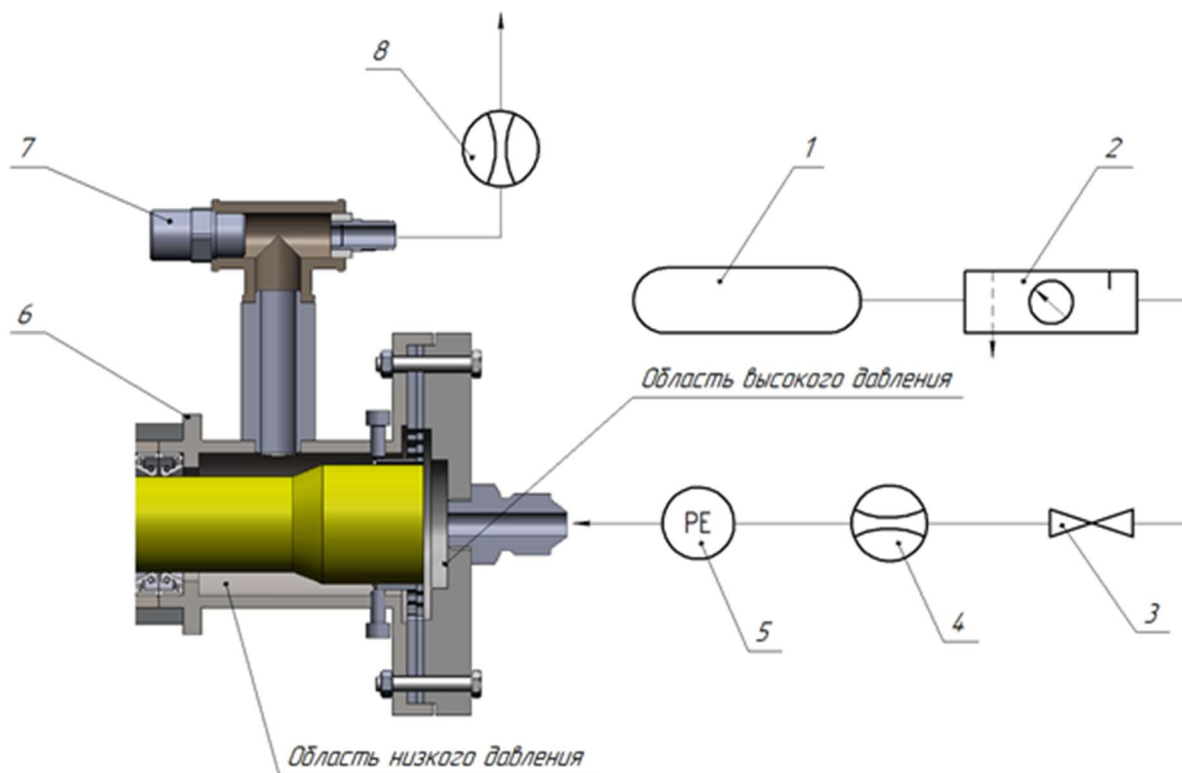
**Рисунок 1 – Испытательная установка:** 1 – корпус подшипникового узла, 2 – подшипник качения, 3 – дистанционная втулка, 4 – гайка, 5 – дистанционное кольцо с манжетным уплотнением, 6 – вал

Установка работает следующим образом. Сжатый воздух под давлением поступает через пневматическую систему в узел установки через штуцер и протекает через бесконтактное пальчиковое уплотнение, ограничивающее переток сжатого воздуха из области высокого давления в область низкого давления. Контроль давления на выходе осуществляется при помощи датчика давления (8). Сброс избыточного давления происходит при помощи клапана сброса избыточного давления (на рисунке не показан). Для регулирования зазора между подъемными площадками пальчиков используются винты расположенные по периметру корпуса уплотнительного узла. Данная пневматическая система (рисунок 2) была подвержена определенным изменениям. Произведена замена механического манометра на датчик давления. Добавления датчиков давления вместо манометров было обусловлено самой работой манометров, которые не могли уловить малую величину давления из-за их способа работы [9,10]. В результате были произведены корректировки компонентов информационно-измерительной системы для дальнейшего проведения эксперимента.

В рамках проведения эксперимента было выявлено, что показания расходомеров на входе в уплотнительный узел было выше, чем на выходе из уплотнительного узла. Это могло означать, что в уплотнительном узле или иных деталях входящих в уплотнительный узел имелась большая утечка воздуха, что и привело к таким показаниям. Для проверки этого предположения было предложено минимизировать утечки уплотняемой среды через элементы установки. Для предотвращения уровня утечки воздуха, через резьбовые элементы, выполненные в корпусе для регулировочных винтов были спроектированы вставки с различными вариантами зазора 1, 1.5, 2 мм (рисунок 3). Данные величины зазора были сделаны с целью выявления изменения величины расхода. Монтировавшийся в корпус уплотнительного узла (рисунок 4) перекрывая своей поверхностью резьбовые элементы, сделанные по периметру корпуса.

Еще одно предположение по утечки воздуха из уплотнительного узла это неполное место прилегание манжетного уплотнения к поверхности полиамидного вала. Вместо

полиамидного вала был смонтирован металлический с манжетным уплотнением интегрированным в дистанционное кольцо.



**Рисунок 2 – Пневматическая схема подачи сжатого воздуха в экспериментальный модуль:**

1 – ресивер компрессора, 2 – блок подготовки воздуха, 3 – управляемый вентиль, 4,8 – расходомер, 5, 7 – датчики давления, 6 – экспериментальный модуль бесконтактного уплотнительного устройства

После устранения дополнительных утечек в экспериментальном узле (модуле) показания расхода на входе стало ниже, чем на выходе [11]. Дальнейшим действием стало проведение эксперимента на пластмассовых вставках для наглядного представления об изменении величин давления и расхода в зависимости от величин зазора.



**Рисунок 3 – Пластиковые вставки с различной величиной зазора**

При постановке эксперимента был сформирован набор управляемых параметров, набор варьирующих характеристик и диапазон их измерения представленных в таблице 1.



Рисунок 4 – Установленная пластмассовая вставка в корпусе уплотнительного узла

Таблица 1 - Управляющие параметры

№	Параметр	Диапазон измерений	Число уровней
1	Давление подачи, бар	1-3	3
2	Зазор, мм	1, 1,5, 2	3

В идеальном случае для достоверности эксперимента требуется перебрать все допустимые наборы уровней факторов друг с другом, что определяет число возможных опытов. Для рассматриваемого случая имеем факторный эксперимент вида  $n = n_1 \cdot n_2$ , где  $n_1$  и  $n_2$  – число уровней соответствующего фактора,  $n = 6$  число опытов. Согласно принципу репликации каждый опыт проводился 7 раз [12-14]. Таким образом, число испытаний составляет 42 раз. В случае качественной и количественной повторяемости полученных значений опыт останавливался и выполнялся переход к следующей комбинации с целью уменьшения количества опытов.

После проведения эксперимента были получены данные, среднее значение которых занесены в таблицу 2. В таблице:  $P_{вх}$  – давление на входе в уплотнительный узел,  $P_{вых}$  – давление на выходе из уплотнительного узла.

Таблица 2 - Экспериментальные данные

Зазор, мм	Давление подачи из ресивера					
	1 бар		2 бар		3 бар	
	$P_{вх}$ , Па	$P_{вых}$ , Па	$P_{вх}$ , Па	$P_{вых}$ , Па	$P_{вх}$ , Па	$P_{вых}$ , Па
	3740	3064	12116	11914	21256	19791
	3500	3050	11799	11294	19994	18981
	2900	2894	11500	11300	19661	18977

Для подтверждения экспериментальных данных был произведён расчет пневматической магистрали в CAD системе. Трехмерная модель уплотнительного узла (рисунок 5) и результаты расчета представлены на рисунке 6 и 7. Значения величин давления после моделирования занесены в таблицу 3.

Таблица 3 - Данные полученные в результате моделирования.

Зазор, мм	Давление подачи из ресивера					
	1 бар		2 бар		3 бар	
	Рвх, Па	Рвых, Па	Рвх, Па	Рвых, Па	Рвх, Па	Рвых, Па
	3440	2764	11166	10914	20256	19791
	3200	2700	10799	10294	18994	19981
	2600	2595	10500	10300	18661	19977

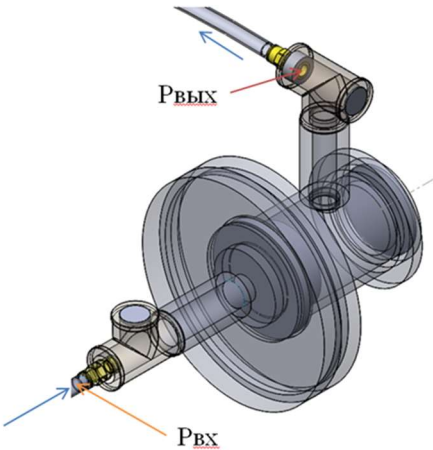


Рисунок 5 – Трехмерная модель уплотнительного узла с граничными условиями для расчета

Стрелками синего цвета обозначено направление движения уплотняемой среды. Красными обозначены поверхности, на которых задавались граничные условия давления для решения задачи потока в CAD системе.

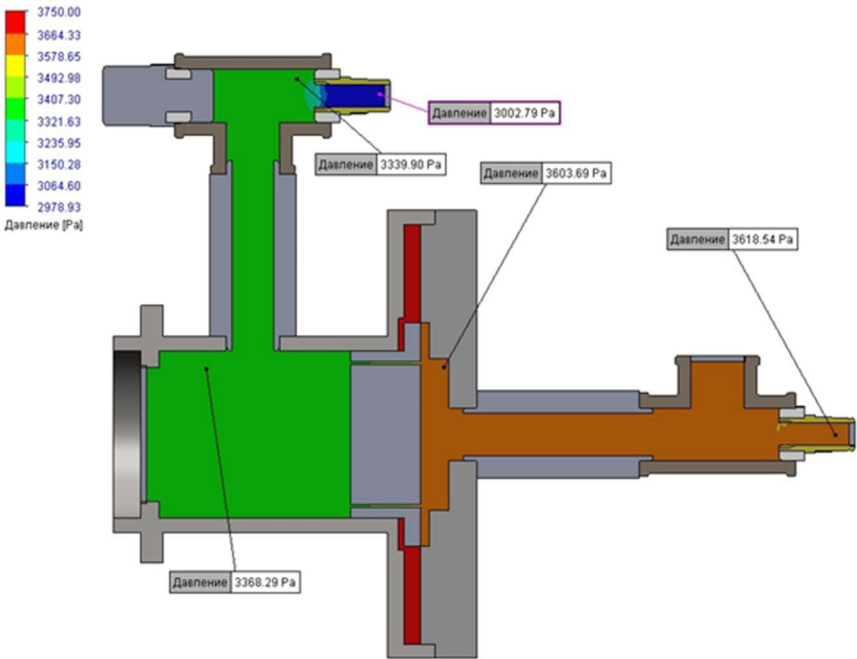
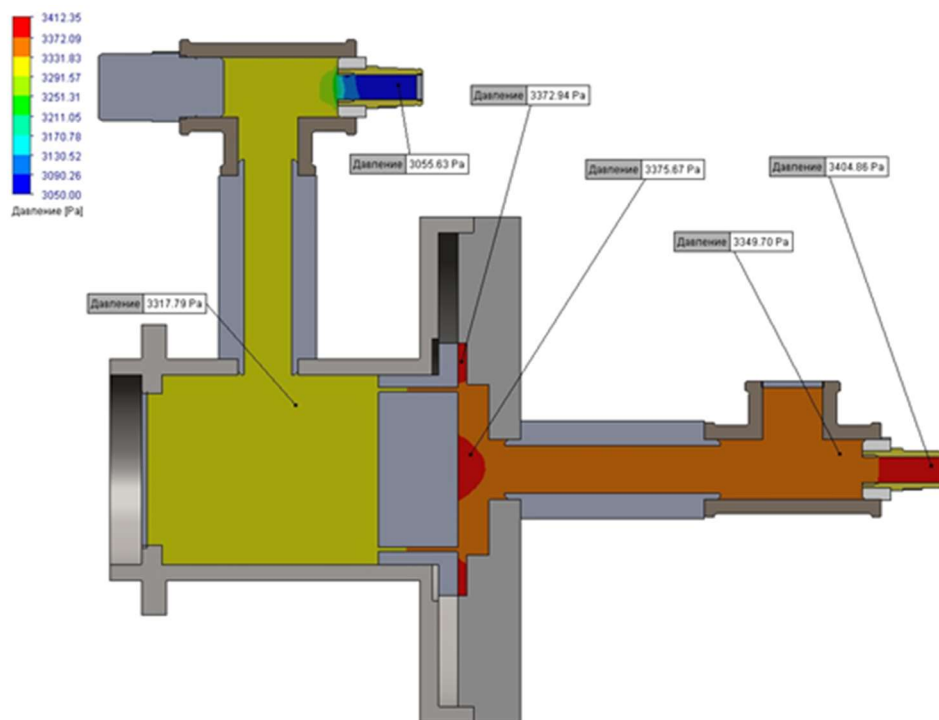


Рисунок 6 – Результаты расчета давления в поперечном сечении уплотнительного узла при зазоре 1 мм



**Рисунок 7 – Результаты расчета давления в поперечном сечении уплотнительного узла при зазоре 1,5 мм**

В виду неизвестности истинного значения измеряемой величины  $X$  неизвестно, то в качестве него примем среднее арифметическое получившихся результатов испытаний:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = 3740 \text{ Па}, \quad (1)$$

где  $n$  - число повторений,  
 $i$  - номер повторного опыта.

Для нахождения среднего квадратического отклонения  $S$  используем эмпирический стандарт [9, 11]:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{X} - X_i)^2}{n-1}} = 1475 \text{ Па}, \quad (2)$$

Истинное значение  $X$  измеряемой величины, полученное в результате серии из  $n = 6$  повторений, при заданном уровне значимости  $\alpha$  (доверительная вероятность  $p = 1 - \alpha$ ) оцениваем посредством соотношения [35]:

$$X = \bar{X} \pm \frac{S}{\sqrt{n}} t_{\alpha; k} = 3740 \pm 1536, \quad (3)$$

где  $t_{\alpha; k}$  - коэффициент Стьюдента, зависящий от уровня значимости  $\alpha$  и числа степеней свободы  $k = n - 1$  и определяемый по таблицам

$t$  - распределения (распределения Стьюдента). Для принятого при обработке опытных данных уровня значимости  $\alpha = 0.05$  ( $p = 0.95$ ) и  $t = 6 - 1 = 5$  [10].

Величину  $\Delta\alpha_{cl} = t_{\alpha; k} \cdot S$  мы будем называть случайной погрешностью величины  $\alpha$ .

Найдем относительную погрешность экспериментальных и теоретических значений:

$$\gamma = \frac{\Delta\alpha_{cl}}{\bar{X}} \cdot 100\% \quad (4)$$

На рисунке 8 представлены результаты сравнительного анализа экспериментальных результатов с расчетными данными.

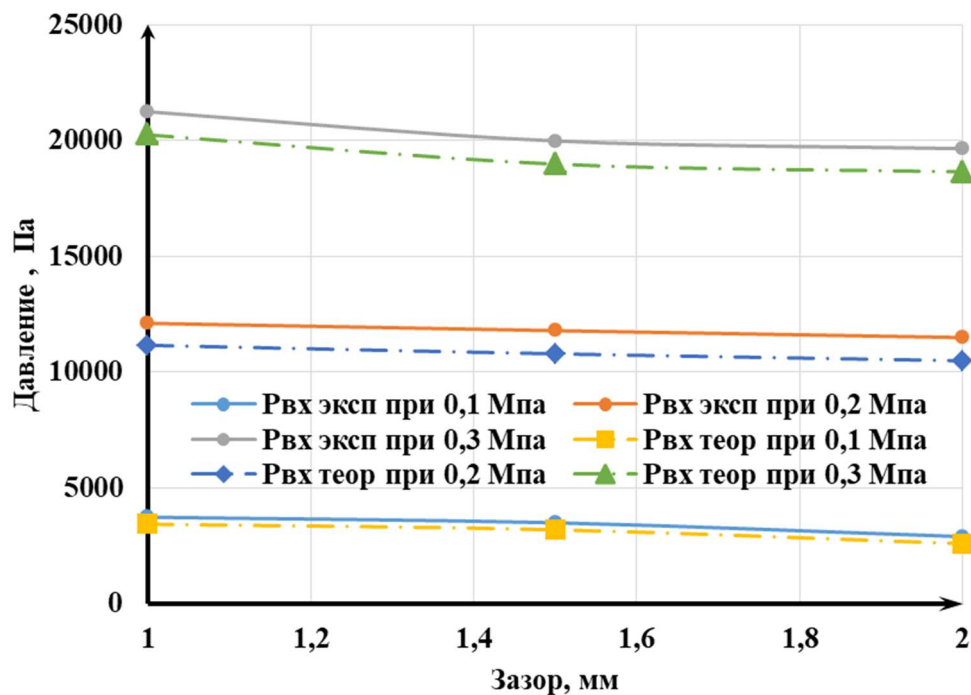


Рисунок 8 – Сравнительный анализ экспериментальных результатов и расчетных данных

### Выводы

Результаты сравнительного анализа экспериментальных результатов позволяют говорить о качественном и количественном подтверждении теоретических данных. Расхождение теоретических и экспериментальных результатов составило в среднем 10,6 % при максимальной погрешности в 15,4%, таким образом, можно считать сходимость результатов удовлетворительной.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Non-contacting Finger Seal Developments and Design Considerations: Thermofluid and Dynamics Characterization, Experimental / M.J. Braun, H.M. Pierson, D. Deng // NASA/CP-2005-213655/V.1, – pp. 181–208.
2. 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 – Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №6 (350) – 2021. С.71 – 77.
3. Бондаренко, М.Э. Анализ экспериментальных исследований активной комбинированной опоры ротора / М.Э. Бондаренко, Р.Н. Поляков, М.А. Токмакова, А.Д. Серебренников // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №1(357) – 2023. С.133 – 140.
4. Майоров, С.В. Исследование динамики асимметричного ротора в активных комбинированных опорах / С.В. Майоров, М.Э. Бондаренко, М.А. Токмакова, В.А. Позднякова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева – № 3 (353) -2022 – С. 73-82.
5. Бондаренко, М.Э. Комбинированный подшипниковый узел с изменяемыми жёсткостными и демпфирующими характеристиками / М.Э. Бондаренко, Р.Н. Поляков, А.В. Горин, В.А. Позднякова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №5(355) – 2022. С.51 – 58.
6. Сытин, А.В. Расчет характеристик упорного лепесткового газодинамического подшипника совместным решением задач газодинамики и теории упругости / А.В. Сытин, С.А. Власова, А.Д. Серебренников, К.В. Смирнова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №5(361) – 2023. С.72 – 80.
7. Сытин, А.В. Расчет характеристик радиального лепесткового газодинамического подшипника с изменяемой геометрией опорной поверхности / А.В. Сытин, С.А. Власова, И.А. Серенко, А.Д. Серебренников // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №6(362) – 2023. С.108 – 116.
8. Родичев, А.Ю. Система мониторинга состояния узлов и агрегатов промышленного оборудования / А.Ю. Родичев, А.В. Горин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №6(362) – 2023. С.101 – 108.



9. Шутин, Д.В. Управление сервоклапанами для реализации активной смазки гидростатодинамических подшипников / Д.В. Шутин, К.К. Настепанин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №3(359) – 2023. С.137 – 144.

10. Шутин, Д.В. Анализ точности показаний датчиков перемещений при определении положения ротора в опорах жидкостного трения / Д.В. Шутин, А.С. Фетисов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №3(353) – 2022. С.103 – 110.

11. Горин, А.В. Анализ методов управления и классификаций для диагностирования аномальных состояний / А.В. Горин, Р.К. Зарецкий, А.К. Поздняков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №3(353) – 2022. С.59 – 67.

12. Фетисов, А.С. Экспериментальный анализ точности определения положения ротора в опорах жидкостного трения / А.С. Фетисов, Д.В. Шутин, М.Н. Сметанин, К.К. Настепанин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №6(356) – 2022. С.83 – 91.

13. Родичев, А.Ю. Исследование возможности применения искусственных нейронных сетей для диагностики роторно-опорных узлов / А.Ю. Родичев, Р.Н. Поляков, К.В. Васильев, Е.М. Минаева // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №6(356) – 2022. С.91 – 96.

14. Родичев, А.Ю. Экспериментальный узел лабиринтных уплотнений в мехатронных механизмах / А.Ю. Родичев, А.В. Внуков, И.В. Родичева, К.В. Васильев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №5(361) – 2023. С.59 – 65.

**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

**Внуков Алексей Васильевич**

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

**Поляков Роман Николаевич**

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

**Преснецова Виктория Юрьевна**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел  
Доцент кафедры информационных систем и  
цифровых технологий  
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 29  
E-mail: larafrilenkova@yandex.ru

A.V. GORIN, R.N. POLYAKOV, A.V. VNUKOV, I.V. RODICHEVA, V.Yu. PRESNETSOVA

## EXPERIMENTAL STUDIES OF THE TECHNICAL CONDITION OF NON-CONTACT SEALS IN ROTOR-SUPPORT ASSEMBLY

**Abstract.** The article discusses the issue of studying the technical condition of non-contact seals of rotor-support units. An experimental setup including non-contact seals is described. A pneumatic circuit for supplying compressed air to the experimental module was designed. The results of experimental and theoretical studies of the technical condition of non-contact seals are shown. A comparison graph of the results obtained is presented. Conclusions and recommendations for the use of non-contact seals in rotary bearing units are proposed.

**Keywords:** non-contact seal, bearing, experiment, error, parameter, reliability, pressure.

## BIBLIOGRAPHY

1. Non-contacting Finger Seal Developments and Design Considerations: Thermofluid and Dynamics Characterization, Experimental / M.J. Braun, H.M. Pierson, D. Deng // NASA/CP-2005-213655/V.1, – pp. 181–208.
2. Polyakov, R.N. Study of labyrinth seals in mechatronic mechanisms / R.N. Polyakov, A.V. Vnuikov, 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.



3. Bondarenko, M.E. Analysis of experimental studies of active combined rotor support / M.E. Bondarenko, R.N. Polyakov, M.A. Tokmakova, A.D. Serebrennikov // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 1 (357) – 2023. P. 133 – 140.
4. Mayorov S.V. Study of the dynamics of an asymmetric rotor in active combined supports / S.V. Mayorov, M.E. Bondarenko, M.A. Tokmakova, V.A. Pozdnyakova // Fundamental and applied problems of engineering and technology. – Orel: OSU named after I.S. Turgenev – No. 3 (353) 2022 – P. 73-82.
5. Bondarenko, M.E. Combined bearing unit with variable rigidity and damping characteristics / M.E. Bondarenko, R.N. Polyakov, A.V. Gorin, V.A. Pozdnyakova // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 5 (355) – 2022. P. 51 – 58.
6. Sytin, A.V. Calculation of characteristics of a thrust petal gas-dynamic bearing by joint solution of problems of gas dynamics and elasticity theory / A.V. Sytin, S.A. Vlasova, A.D. Serebrennikov, K.V. Smirnova // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 5 (361)–2023. P. 72–80.
7. Sytin, A.V. Calculation of characteristics of a radial petal gas-dynamic bearing with variable geometry of the supporting surface / A.V. Sytin, S.A. Vlasova, I.A. Serenko, A.D. Serebrennikov // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 6 (362) – 2023. P. 108 – 116.
8. Rodichev, A.Yu. System for monitoring the condition of components and assemblies of industrial equipment / A.Yu. Rodichev, A.V. Gorin // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 6 (362) – 2023. P. 101 – 108.
9. Shutin, D.V. Control of servo valves for the implementation of active lubrication of hydrodynamic bearings / D.V. Shutin, K.K. Nastepanin // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 3 (359) – 2023. P. 137 – 144.
10. Shutin, D.V. Analysis of the accuracy of displacement sensor readings when determining the position of the rotor in fluid friction supports / D.V. Shutin, A.S. Fetisov // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 3 (353) – 2022. P. 103 – 110.
11. Gorin, A.V. Analysis of control methods and classifications for diagnosing anomalous conditions / A.V. Gorin, R.K. Zaretsky, A.K. Pozdnyakov // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 3(353) – 2022. P.59 – 67.
12. Fetisov, A.S. Experimental analysis of the accuracy of determining the rotor position in fluid friction supports / A.S. Fetisov, D.V. Shutin, M.N. Smetanin, K.K. Nastepanin // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 6 (356) – 2022. P. 83 – 91.
13. Rodichev, A.Yu. Study of the possibility of using artificial neural networks for the diagnosis of rotor-support units / A.Yu. Rodichev, R.N. Polyakov, K.V. Vasiliev, E.M. Minaeva // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 6 (356) – 2022. P. 91 – 96.
14. Rodichev, A.Yu. Experimental unit of labyrinth seals in mechatronic mechanisms / A.Yu. Rodichev, A.V. Vnukov, I.V. Rodicheva, K.V. Vasiliev // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 5 (361) – 2023. P. 59 – 65.

**Polyakov Rman Nikolaevich**

Orel State University

Associate 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

**Presnetsova Victoria Yurievna**

Orel State University

Associate professor of the department information systems and digital technologies

302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29

E-mail: larafrolenkova@yandex.ru

**Vnukov Alexey Vasilevich**

Orel State University

Applicant of the department mechatronics, mechanics and robotics

302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29

E-mail: rodfox@yandex.ru

**Rodicheva Irina Vladimirovna**

Orel State University named after I.S. Turgenev

graduate student of the department mechatronics, mechanics and robotics

302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29

E-mail: rodfox@yandex.ru

А.Ю. КОРНЕЕВ, А.В. СЫТИН, А.Д. СЕРЕБРЕННИКОВ, А.В. СУХОРУЧКО

## ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА КОНИЧЕСКИХ ЛЕПЕСТКОВЫХ ПОДШИПНИКОВ ПРИ СМАЗКЕ НЕОНОМ

**Аннотация.** Предложена математическая модель расчета конических лепестковых подшипников при смазке неоном. Представлены расчетные схемы подшипника и лепестка, функция зазора в смазочном слое подшипника, уравнение Рейнольдса и баланса энергий, результаты аппроксимации теплофизических свойств. Описаны преимущества данного типа опор.

**Ключевые слова:** конический лепестковый подшипник, турбулентность, лепесток, уравнение Рейнольдса, уравнение баланса энергий, аппроксимация теплофизических свойств неона.

### Введение

Стандартная компоновка высокоскоростного роторного агрегата предусматривает наличие двух радиальных и одного/двух осевых подшипников, что влечет дополнительные требования к точности изготовления, шероховатости поверхности, материалу деталей и чистоте смазочного материала. Снижение массогабаритных характеристик, особенно важное для нестационарных роторных агрегатов, достигается заменой всех подшипников едиными радиально-упорными узлами, среди которых особое место занимают конические подшипники, характеризующиеся широким диапазоном параметров, а также конструктивно задаваемым соотношением воспринимаемых радиальных и осевых нагрузок в рамках одного опорного узла [1-3]. Повышение частот вращения предполагает закритическую рабочую зону с минимальными потерями при переходе критических частот. Демпфирование возникающих колебаний происходит непосредственно в смазочном слое подшипника скольжения, однако этого бывает недостаточно, в результате чего возможны соударения цапфы вала и втулки, сопровождаемое возникновением трещин, выкрашиванием поверхности с последующим разрушением или заклиниванием опоры из-за заполнения зазора осколками контактирующих деталей [4-7]. Решением данной проблемы является применением упругих элементов в виде демпферов или непосредственно формирующих рабочую поверхность наборов тонкостенных металлических лепестков [8-10].

### Основная часть

Для лепестковых подшипников скольжения независимо от применяемого смазочного материала податливость элементов является необходимым условием работы, причем упругие деформации элементов могут иметь тот же порядок величины, что и толщина смазочной пленки. Конструкции конических лепестковых подшипников могут иметь различное количество упругих элементов, расположенных внахлест друг на друга, образуя тем самым податливую многоклиновую рабочую поверхность (рисунок 1).

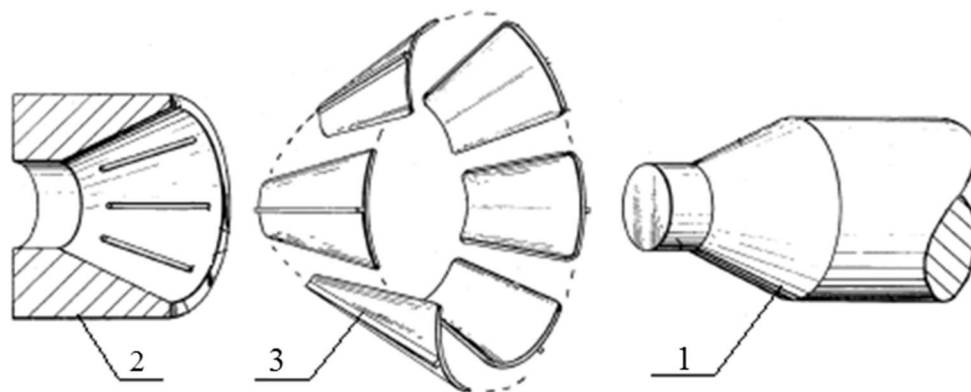


Рисунок 1 – Схема конического лепесткового газодинамического подшипника (патент USA № 4178046 [2]): 1 – ротор, 2 – корпус подшипника, 3 – лепестки

Типовые конструкции лепестковых подшипников скольжения в режиме пуска и останова обладают повышенным износом упругих элементов, приводящему к истиранию поверхностного слоя, резкому повышению температуры, нарушению целостности лепестков и провалам в поле давлений. Минимизация износа, в совокупности с нанесением дополнительных твердых износостойких покрытий [3], достигается:

- применением комбинированных опор, включающих подшипники качения, скольжения, электромагнитные узлы;
- применением систем подачи смазочного материала под давлением в рабочую зону;
- применением дополнительных механических или мехатронных систем разгрузки в периоды пуска, останова и при аварийных режимах работы.

Расчет статических характеристик подшипников скольжения, таких как несущая способность (грузоподъемность), потери на трение в слое смазки и расход, предполагает определение функции распределения давлений по опорной поверхности подшипника [1, 2]. Решение задачи гидродинамики для нахождения поля давлений в смазочном слое основано на совместном решении уравнений, отражающих три фундаментальных закона сохранения: массы, импульса и энергии. Для описания течения вязкой сжимаемой жидкости используется система уравнений в частных производных: уравнение неразрывности, уравнение количества движения (уравнения Навье-Стокса) и уравнения энергии, а также уравнения теплофизических параметров, которые замыкают систему дифференциальных уравнений [1, 2]. При совместном решении уравнений газодинамики, теплофизики и теории упругости (рисунок 2) связующим звеном является функция радиального зазора.



Рисунок 2 – Блок-схема решения комплексной задачи расчета полей давлений в смазочном слое подшипника

Каждый лепесток описывается тонкой незамкнутой конической оболочкой (рисунок 3), а конструктивные особенности, такие как укладка лепестков внахлест, или многослойные конструкции описываются соответствующими выражениями совместных деформаций и граничными условиями. Наиболее широкое применение конические оболочки находят в авиационной технике и машиностроении. Одной из первых работ по исследованию устойчивости конических оболочек была работа Х.М. Муштари [8]. По сравнению с расчетом цилиндрических оболочек исследовать такие конструкции значительно труднее. Это проявляется, прежде всего, в усложнении геометрических соотношений, связывающих перемещения и деформации.

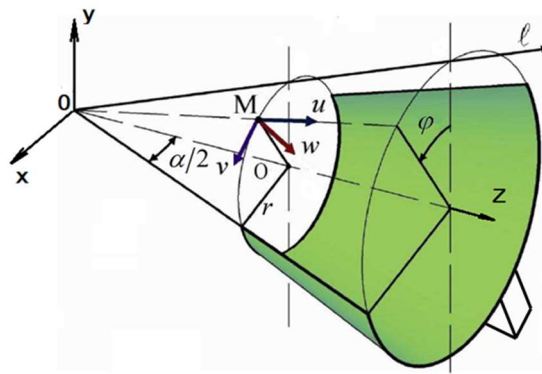


Рисунок 3 – Расчетная схема конической оболочки

Как известно в работах [7-10], в данном случае исходными уравнениями для исследования могут служить дополненные инерционными членами уравнения теории оболочек в форме Муштари – Власова, которые для конических оболочек представляются в виде:

$$\begin{cases} \frac{1}{12(1-\mu^2)} \nabla^2 \nabla^2 \bar{w} + \frac{\operatorname{ctg}(\alpha/2)}{\bar{r}} \frac{\partial^2 \bar{\sigma}}{\partial \bar{r}^2} = \frac{\bar{l}^2}{E} \left( \rho l^2 \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial t^2} + p \bar{l} \right), \\ \nabla^2 \nabla^2 \bar{f} + \frac{\bar{l}^2 \operatorname{ctg}(\alpha/2)}{\bar{r}} \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial \bar{r}^2} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial \bar{r}^2} + \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial}{\partial \bar{r}} + \frac{1}{\bar{r}^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2}, \quad \varphi_\gamma = \varphi \sin(\alpha/2), \quad \bar{\sigma} = \frac{\sigma}{E \delta^3}, \quad \bar{r} = \frac{r}{l}, \quad \bar{w} = \frac{w}{l}, \quad \bar{l} = \frac{l}{\delta},$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона;

$w = f(r, \varphi)$  – функция нормального прогиба (перпендикулярно образующей оболочки);

$p = f(r, \varphi)$  – функция давления;

$\alpha$  – угол конусности;

$\sigma$  – функция напряжений;

$l$  – расстояние по образующей от вершины конуса до его основания;

$E$  – модуль упругости;

$\rho$  – плотность материала лепестка;

$t$  – время;

$\delta$  – толщина лепестка.

Для полноценного описания работы конического лепесткового подшипника необходимо определить граничные условия для упругих элементов, зоны совместных деформаций и дополнительные силовые и геометрические параметры. Для этого выделим нижнюю и верхнюю часть лепестка, а также зоны контакта с корпусом и крепления (рисунок 4).

$$w = \begin{cases} 0, & \varphi \in [0, \varphi_{кор}] \\ w_{vi-1}, & \varphi \in [0, \varphi_n], \delta = 2\delta; \\ 0, & \varphi \in [\varphi_n, \varphi_n + \varphi_{кр}] \\ w_{ni+1}, & \varphi \in [\varphi_n + \varphi_{кр}, \varphi_n + \varphi_{кр} + \varphi_\epsilon], \delta = 2\delta. \end{cases} \quad (2)$$

где  $\varphi_n$  – угловая протяженность нижней части лепестка,

$\varphi_\epsilon$  – угловая протяженность верхней части лепестка,

$\varphi_{кор}$  – угловая протяженность контакта нижней части лепестка с корпусом,

$\varphi_{кр}$  – угловая протяженность крепления лепестка,  $\delta$  – толщина лепестка.

Для случая эксцентричного положения цапфы в коническом лепестковом подшипнике функция зазора будет включать в себя уже три составляющие (помимо функции зазора между валом и конической поверхностью  $h(r, \varphi)$  и функции зазора вдоль поверхности сегмента  $h_s$  добавляется упругий прогиб лепестка) и выглядит следующим образом [11]:

$$h = h(r, \varphi) + h_s + w, \quad (3)$$

где  $w = f(r, \varphi)$  – функция прогиба лепестка.

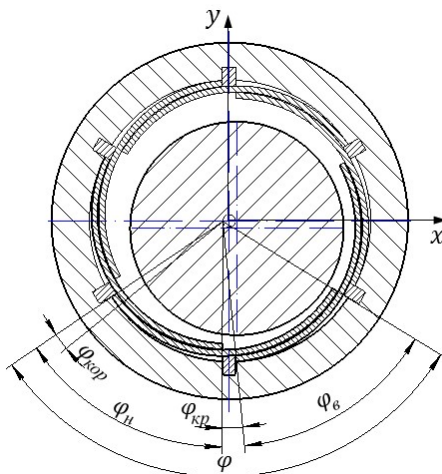


Рисунок 4 – Расчетная схема конического подшипника

В рамках поставленной задачи результатом решения систем уравнений (1, 2) является нахождение функции нормального прогиба  $w = f(r, \varphi)$ , входящей в выражение (3) для определения функции зазора в коническом лепестковом подшипнике. Дальнейшая подстановка функции зазора  $h$  в уравнение Рейнольдса для определения функции давления  $p = f(r, \varphi)$  замыкает систему уравнений для расчета полей давлений.

С учетом приведенных выше формул можно записать конечную формулу по определению функции полного зазора в коническом лепестковом подшипнике:

$$h = \frac{2h_0}{1 + \cos(n\varphi_s - \varphi)} - \left[ X \sin\left(\frac{\varphi}{\sin(\alpha/2)}\right) + Y \cos\left(\frac{\varphi}{\sin(\alpha/2)}\right) \right] \cos(\alpha/2) + \\ + Z \sin(\alpha/2) - \left( r - \frac{R_1}{\sin(\alpha/2)} \right) \operatorname{tg} \gamma + w. \quad (4)$$

Основой расчета гидродинамических сил и динамических характеристик опор жидкостного трения, в том числе и исследуемых, является знание распределения давлений в смазочном слое. Течение смазочной среды описывается системой уравнений гидромеханики, в которую входят уравнения: неразрывности и Навье-Стокса (смазочный материал – ньютоновская жидкость).

Преобразование уравнений неразрывности и Навье-Стокса с учетом компонентов тензора напряжений приводит к выводу обобщенного уравнения Рейнольдса [12 – 14] на случай двумерного турбулентного течения сжимаемой вязкой жидкости в зазоре конической опоры:

$$\frac{\partial}{r \partial r} \left[ \frac{\rho r h^3}{\mu K_r} \frac{\partial p}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{r \partial \varphi} \left[ \frac{\rho h^3}{\mu K_\varphi} \frac{\partial p}{r \partial \varphi} \right] = \\ = 12h \frac{\partial \rho}{\partial t} + 6 \frac{\partial}{r \partial r} (\rho r h V_r) + 6 \frac{\partial}{r \partial \varphi} (\rho h V_\varphi) + 12 \rho V_y, \quad (5)$$

где коэффициенты турбулентности определяются по следующим зависимостям:

$$K_{\phi} = 1 + 0,044 \cdot \text{Re}^{0,725}; \quad K_r = 1 + 0,0247 \cdot \text{Re}^{0,65}, \quad (6)$$

значение числа Рейнольдса определяется как:

$$\text{Re} = (k^*)^2 \frac{\omega R_u^* \rho h}{\mu},$$

где  $\rho$  и  $\mu$  – плотность и вязкость смазочного материала,

$R_u^*$  – текущий радиус цапфы,

$k^*$  – коэффициент Кармана, определяющий величину пути смещения и зависящий от радиального зазора. Коэффициент  $k^*$  может принимать следующие значения:  $k^* \approx 0,2 \dots 0,4$ ; причем малые значения  $k^*$  соответствуют малым радиальным зазорам от 10 до 100 мкм. Часто рассчитывают коэффициент Кармана по эмпирической зависимости:  $k^* = 0,125 \cdot \text{Re}^{0,07}$ .

Значения скоростей в точках на поверхности цапфы ( $V_r, V_y, V_{\phi}$ ) определяются при решении уравнений динамики ротора.

Решение уравнения (5) позволяет определить поле давлений  $p(r, \phi)$  в конкретный момент времени. Граничные условия для уравнения (5) определяются конкретным типом опоры и условиями ее работы. Применительно к высокоскоростным опорам турбомашин их можно записать в виде:

1) заданное давление слива  $p_s$  (на торце опоры):  $p(r_2, \phi) = p_s$ ,

2) условие неразрывности (сплошности) смазочного слоя по координате  $\phi$  (гипотеза Зоммерфельда) [13, 14]:

$$p(r, 0) = p(r, 2\pi \sin(\alpha/2)); \quad \frac{\partial p}{\partial \phi}(r, 0) = \frac{\partial p}{\partial \phi}(r, 2\pi \sin(\alpha/2)).$$

В гидравлическом тракте подшипника скольжения возможно одновременное существование зон однофазного и двухфазного состояния смазочного материала. В зоне однофазного течения (жидкость или газ) энтальпия является функцией только давления и температуры и, так как изменение термодинамических свойств по толщине несущего слоя считаем пренебрежимо малым, можно записать:  $I = I[p(r, \phi, t), T(r, \phi, t)]$ . Поскольку температура и давление смазочного материала на линии насыщения взаимосвязаны:  $p = p(T)$ , то в двухфазной области энтальпию можно рассматривать как функцию только двух термодинамических параметров, например давления и газосодержания:  $I = I[p(r, \phi, t), \chi(r, \phi, t)]$ . Обобщая все приведенные выше рассуждения, запишем уравнения баланса энергий в окончательном виде:

$$\begin{aligned} & \rho h \left[ \frac{\partial I}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial t} + C_p \frac{\partial T}{\partial t} \right] + \rho \left[ \frac{V_r h}{2} - \frac{h^3}{12\mu K_r} \frac{\partial p}{\partial r} \right] \left[ \frac{\partial I}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial r} + C_p \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \\ & + \rho \left[ \frac{V_{\phi} h}{2} - \frac{h^3}{12\mu K_{\phi}} \frac{\partial p}{r \partial \phi} \right] \left[ \frac{\partial I}{\partial p} \frac{\partial p}{r \partial \phi} + C_p \frac{\partial T}{r \partial \phi} \right] = \frac{\partial p}{\partial t} h + \frac{h}{2} \left[ V_r \frac{\partial p}{\partial r} + V_{\phi} \frac{\partial p}{r \partial \phi} \right] + \\ & + \frac{\mu}{h} [K_r V_r^2 + K_{\phi} V_{\phi}^2] + \frac{\mu h}{3r^2} \left[ \frac{4}{3} K_r V_r^2 + K_{\phi} V_{\phi}^2 \right] - \frac{h^3}{3r^2} \left[ \frac{V_r}{3} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{V_{\phi}}{4} \frac{\partial p}{r \partial \phi} \right] + \\ & + \frac{h^5}{30\mu r^2} \left[ \frac{1}{3K_r} \left( \frac{\partial p}{\partial r} \right)^2 + \frac{1}{4K_{\phi}} \left( \frac{\partial p}{r \partial \phi} \right)^2 \right]; \end{aligned} \quad (7)$$

Рассмотренная система уравнений – Рейнольдса (5) и баланса энергий (7) – является недоопределенной, т. к. число неизвестных параметров ( $p, \rho, T, I, \mu$ ) превышает число уравнений. Дополнительными соотношениями, доопределяющими эту систему, являются зависимости теплофизических свойств смазочного материала от давления и температуры.

При оценивании параметров уравнений, описывающих теплофизические свойства рабочих тел с помощью ЭВМ в качестве независимых параметров задавались значения температуры  $T=x_1$  и давления  $P=x_2$ , а в роли зависимой переменной выступал искомый

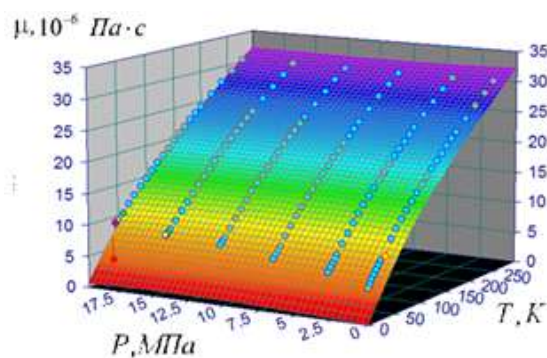


параметр. Аппроксимация значений от одной независимой переменной реализована во многих математических пакетах. Программный пакет TableCurve 3D – это автоматическая система построения поверхностей, в которой реализована аппроксимация функции двух независимых переменных. В ее возможности также входит: создание калибровочных кривых и таблиц, подгонка по табличным данным, построение логических кривых и анализ данных. Для аппроксимации поверхностей в TableCurve 3D задействовано более 450 млн. встроенных уравнений, причем подгонка наиболее подходящих из них производится со скоростью 36 000 функций в секунду.

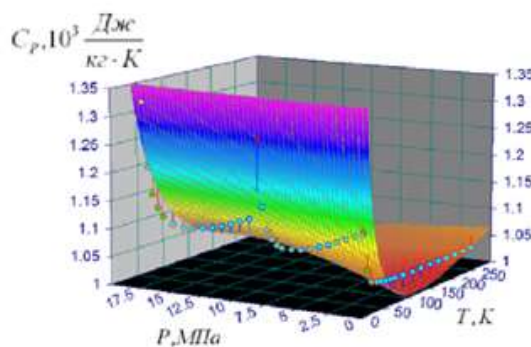
В качестве смазочного материала в газодинамических подшипниках с упругими элементами наиболее часто используется воздух. Помимо этого, возможно применение, например, неона, при этом для большинства параметров один из факторов (давление или температура) является определяющим, поэтому большинство параметров зависят от одного главного фактора при определенном значении другого. Результаты аппроксимации свойств неона в диапазоне  $T = 28 - 280\text{K}$ ,  $P = 0,1 - 20\text{ МПа}$ , представлены в виде аналитических зависимостей  $f=f(P,T)$  и приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты аппроксимации теплофизических свойств неона

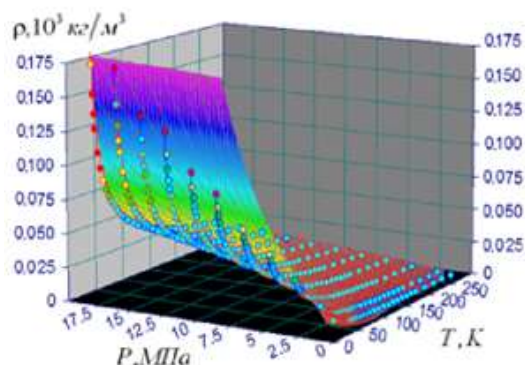
Параметр	Аналитическая зависимость
Вязкость, $\mu$ $10^{-6}\text{ Па}\cdot\text{с}$	$6,638 + 17,172 \cdot T + 10,576 \cdot P - 0,035 \cdot T^2 - 0,108 \cdot P^2 - 0,061 \cdot T \cdot P + 4,68 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 - 0,014 \cdot P^3 + 0,0029 \cdot T \cdot P^2 - 2,6 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 \cdot P$
Плотность, $\rho$ $10^3\text{ кг/м}^3$	$\frac{20,833 - 0,328 \cdot T + 0,0018 \cdot T^2 - 3,32 \cdot 10^{-6} \cdot T^3 + 4,976 \cdot \ln(P) + 1,144 \cdot (\ln(P))^2}{1 + 0,008 \cdot T - 7,12 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 - 4,5 \cdot 10^{-9} \cdot T^3 - 0,381 \cdot \ln(P) - 1,64 \cdot 10^{-5} \cdot (\ln(P))^2}$
Энтальпия, $I$ $10^5\text{ Дж/кг}$	$-1044,48 + 870,65 \cdot \ln(T) - 14,319 \cdot P - 224,67 \cdot (\ln(T))^2 - 0,002 \cdot P^2 + 5,626 \cdot P \cdot \ln(T) + 20,42 \cdot (\ln(T))^3 - 7,58 \cdot 10^{-5} \cdot P^3 + 0,8 \cdot 10^{-3} \cdot P^2 \cdot \ln(T) - 0,552 \cdot P \cdot (\ln(T))^2$
Теплоемкость, $C_p$ $10^3\text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$	$2,54 - 0,646 \cdot \ln(T) + 0,044 \cdot P + 0,068 \cdot (\ln(T))^2 - 7,76 \cdot 10^{-5} \cdot P^2 - 0,008 \cdot P \cdot \ln(T)$



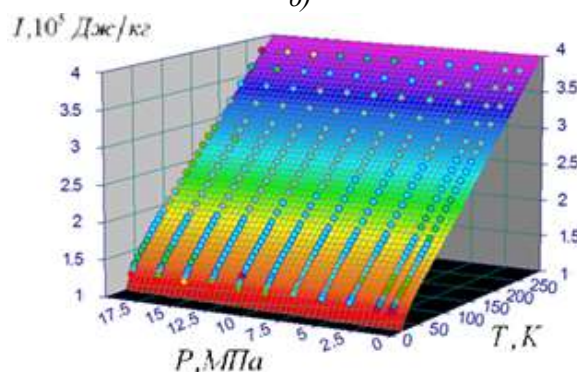
а)



б)



в)



г)

Рисунок 5 – Результаты аппроксимации



## Заключение

Полученные аппроксимационные зависимости неона позволяют рассчитывать подшипники скольжения в неизотермической постановке. Аппроксимационные зависимости с данной степенью точности (погрешности расчета не превышают 1%) при подстановке в уравнение Рейнольдса, для определения полей давлений, и уравнение баланса энергий позволяют рассчитывать подшипники скольжения в неизотермической постановке, что дает более точное описание процессов в смазочном слое приближая математическую модель к реальному объекту.

Не смотря на определенную сложность расчета и изготовления конических лепестковых подшипников, их преимущества и перспективы применения в роторно-опорных узлах насосного и компрессорного оборудования способствуют дальнейшему развитию теоретических и практических исследований.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сытин, А.В. Лепестковые газодинамические подшипники: применение и технические решения: монография / А.В. Сытин, Л.А. Савин; Орел: ОГУ, 2016. – 196 с.
2. Майоров, С.В. Исследование динамики асимметричного ротора в активных комбинированных опорах / С.В. Майоров, М.Э. Бондаренко, М.А. Токмакова, В.А. Позднякова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева – № 3 (353) -2022 – С. 73-82.
3. Бондаренко, М.Э. Комбинированный подшипниковый узел с изменяемыми жёсткостными и демпфирующими характеристиками / М.Э. Бондаренко, Р.Н. Поляков, А.В. Горин, В.А. Позднякова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №5(355) – 2022. С.51 – 58.
4. Сытин, А.В. Расчет характеристик упорного лепесткового газодинамического подшипника совместным решением задач газодинамики и теории упругости / А.В. Сытин, С.А. Власова, А.Д. Серебренников, К.В. Смирнова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №5(361) – 2023. С.72 – 80.
5. Сытин, А.В. Расчет характеристик радиального лепесткового газодинамического подшипника с изменяемой геометрией опорной поверхности / А.В. Сытин, С.А. Власова, И.А. Серенко, А.Д. Серебренников // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №6(362) – 2023. С.108 – 116.
6. Родичев, А.Ю. Система мониторинга состояния узлов и агрегатов промышленного оборудования / А.Ю. Родичев, А.В. Горин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №6(362) – 2023. С.101 – 108.
7. Шутин, Д.В. Управление сервоклапанами для реализации активной смазки гидростатодинамических подшипников / Д.В. Шутин, К.К. Настепанин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №3(359) – 2023. С.137 – 144.
8. Шутин, Д.В. Анализ точности показаний датчиков перемещений при определении положения ротора в опорах жидкостного трения / Д.В. Шутин, А.С. Фетисов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №3(353) – 2022. С.103 – 110.
9. Горин, А.В. Анализ методов управления и классификаций для диагностирования аномальных состояний / А.В. Горин, Р.К. Зарецкий, А.К. Поздняков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №3(353) – 2022. С.59 – 67.
10. Фетисов, А.С. Экспериментальный анализ точности определения положения ротора в опорах жидкостного трения / А.С. Фетисов, Д.В. Шутин, М.Н. Сметанин, К.К. Настепанин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №6(356) – 2022. С.83 – 91.
11. Патент USA, № 4178046, Int. C1 F16C 17/00. Foil bearing. Alexander Silver and James R. Wenban. Appl. No 689,619; 24.05.1979.
12. Казаков В. А., Шлугер М. А. Износостойкие и антифрикционные гальванические покрытия в машиностроении. – Л.: Машиностроение, 1981. – 212 с.
13. Патент USA, № 5885004, Int. C1 F16C 17/03. Hydrostatically supported foil bearing. Joseph K. Scharrer; Robert F. Beatty. Appl. No.: 979,357; 23.03.1999.
14. Патент USA, № 7056025, Int. C1 F16C 32/06. Foil bearing. Hidehiko Nakata. Appl. No.: 10/815,937; 06.06.2006.
15. Конический лепестковый подшипник скольжения Патент на изобретение № 2437005. Зарегистрирован в Государственном реестре изобретений РФ 20.12.2011 г. Савин Л.А., Корнеев А.Ю., Сытин А.В., Ярославцев М.М.
16. Овчаров А.А., Брылев И.С. Математическая модель деформирования нелинейно упругих подкрепленных конических оболочек при динамическом нагружении // Инженерный вестник Дона, 2014. – Вып. 5. — Т. 29.

17. Муштари, Х. М. Об устойчивости тонкостенных конических оболочек круглого сечения при кручении парами / Х. М. Муштари. – В кн. Сборник научных трудов КАИ. – Казань: Издательство Казанского авиационного института, 1935. – С. 39–40.

18. Костылев В. В. К вопросу расчета динамической прочности тонких конических оболочек // Исследования по теории пластин и оболочек, 1966. – Вып. 4. – с. 336 – 341.

19. Костылев В. В. Устойчивость круговых конических оболочек под действием динамического внешнего давления // Исследования по теории пластин и оболочек, 1967. – Вып. 5. – с. 480 – 493.

20. Корнеев А.Ю., Сытин А.В., Ли Шенбо. Функция зазора в конических лепестковых газодинамических подшипниках // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. № 5-2 (313), 2015. – С. 213 – 220.

21. Токарь И.Я. Проектирование и расчет опор трения. М.: Машиностроение, 1971. – 168 с.

22. Корнеев А.Ю., Савин Л.А., Соломин О.В. Математическая модель неизотермического турбулентного течения смазочного материала в конических опорах жидкостного трения // Вестник машиностроения, 2005. – № 7. – С. 37 – 42.

23. Корнеев А.Ю., Савин Л.А., Соломин О.В. Конические подшипники жидкостного трения: монография. М: Машиностроение-1, 2008. – 172 с.

**Корнеев Андрей Юрьевич**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел  
Доцент кафедры мехатроники, механики и  
робототехники  
302030, г. Орел, ул. Московская, 34  
E-mail: korneev\_andrey@mail.ru

**Сытин Антон Валерьевич**

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

**Серебrenников Артем Дмитриевич**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел  
Студент кафедры мехатроники, механики и  
робототехники  
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 29  
E-mail: silver 57@mail.ru

**Сухоручко Алексей Валерьевич**

ООО НТЦ «АПМ», г.Орел  
Руководитель отдела прочностных расчетов  
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 5  
E-mail: sukhoruchko@apm.ru

---

A.Yu. KORNEEV, A.V. SYTIN, A.D. SEREBRENNIKOV, A.V. SUKHORUCHKO

## CALCULATION FEATURES OF TAPED LOPE BEARINGS WITH NEON LUBRICATION

**Abstract.** *A mathematical model for calculating tapered lobe bearings when lubricated with neon is proposed. Calculation diagrams of the bearing and petal, the gap function in the lubricating layer of the bearing, the Reynolds equation and energy balance, and the results of approximation of thermophysical properties are presented. The advantages of this type of support are described.*

**Keywords:** *tapered leaf bearing, turbulence, petal, Reynolds equation, energy balance equation, approximation of thermophysical properties of neon.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Sytin, A.V. Leaf gas-dynamic bearings: application and technical solutions: monograph / A.V. Sytin, L.A. Savin; Orel: OSU, 2016. – 196 p.

2. Mayorov, S.V. Study of the dynamics of an asymmetric rotor in active combined supports / S.V. Mayorov, M.E. Bondarenko, M.A. Tokmakova, V.A. Pozdnyakova // Fundamental and applied problems of engineering and technology. – Orel: OSU named after I.S. Turgenev – No. 3 (353) 2022 – P. 73-82.

3. Bondarenko, M.E. Combined bearing unit with variable rigidity and damping characteristics / M.E. Bondarenko, R.N. Polyakov, A.V. Gorin, V.A. Pozdnyakova // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 5 (355) – 2022. P. 51 – 58.

4. Sytin, A.V. Calculation of characteristics of a thrust petal gas-dynamic bearing by joint solution of problems of gas dynamics and elasticity theory / A.V. Sytin, S.A. Vlasova, A.D. Serebrennikov, K.V. Smirnova // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 5 (361) – 2023. P. 72 – 80.

5. Sytin, A.V. Calculation of characteristics of a radial petal gas-dynamic bearing with variable geometry of the supporting surface / A.V. Sytin, S.A. Vlasova, I.A. Serenko, A.D. Serebrennikov // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 6 (362) – 2023. P. 108 – 116.

6. Rodichev, A.Yu. System for monitoring the condition of components and assemblies of industrial equipment / A.Yu. Rodichev, A.V. Gorin // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 6 (362) – 2023. P. 101 – 108.
7. Shutin, D.V. Control of servo valves for the implementation of active lubrication of hydrodynamic bearings / D.V. Shutin, K.K. Nastepanin // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 3 (359) – 2023. P. 137 – 144.
8. Shutin, D.V. Analysis of the accuracy of displacement sensor readings when determining the position of the rotor in fluid friction supports / D.V. Shutin, A.S. Fetisov // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 3 (353) – 2022. P. 103 – 110.
9. Gorin, A.V. Analysis of control methods and classifications for diagnosing anomalous conditions / A.V. Gorin, R.K. Zaretsky, A.K. Pozdnyakov // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 3(353) – 2022. P.59 – 67.
10. Fetisov, A.S. Experimental analysis of the accuracy of determining the rotor position in fluid friction supports / A.S. Fetisov, D.V. Shutin, M.N. Smetanin, K.K. Nastepanin // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 6 (356) – 2022. P. 83 – 91.
11. USA Patent, No. 4178046, Int. C1 F16C 17/00. Foil bearing. Alexander Silver and James R. Wenban. Appl. No. 689.619; 05/24/1979.
12. Kazakov V. A., Shluger M. A. Wear-resistant and antifriction galvanic coatings in mechanical engineering. – L.: Mechanical Engineering, 1981. – 212 p.
13. USA Patent, No. 5885004, Int. C1 F16C 17/03. Hydrostatically supported foil bearing. Joseph K. Scharrer; Robert F. Beatty. Appl. No.: 979.357; 03/23/1999.
14. USA Patent, No. 7056025, Int. C1 F16C 32/06. Foil bearing. Hidehiko Nakata. Appl. No.: 10/815.937; 06/06/2006.
15. Tapered lobe sliding bearing Patent for invention No. 2437005. Registered in the State Register of Inventions of the Russian Federation on December 20, 2011. Savin L.A., Korneev A.Yu., Sytin A.V., Yaroslavl'tsev M.M.
16. Ovcharov A.A., Brylev I.S. Mathematical model of deformation of nonlinearly elastic reinforced conical shells under dynamic loading // Engineering Bulletin of the Don, 2014. – Vol. 5. — T. 29.
17. Mushtari, Kh. M. On the stability of thin-walled conical shells of circular cross-section under torsion in pairs / Kh. M. Mushtari. - In the book. Collection of scientific works of KAI. – Kazan: Publishing House of the Kazan Aviation Institute, 1935. – P. 39–40.
18. Kostylev V.V. On the issue of calculating the dynamic strength of thin conical shells // Research on the theory of plates and shells, 1966. – Vol. 4. – p. 336 – 341.
19. Kostylev V.V. Stability of circular conical shells under the influence of dynamic external pressure // Research on the theory of plates and shells, 1967. – Vol. 5. – p. 480 – 493.
20. Korneev A.Yu., Sytin A.V., Li Shenbo. Function of the gap in tapered lobe gas-dynamic bearings // Fundamental and applied problems of engineering and technology. No. 5-2 (313), 2015. – P. 213 – 220.
21. Turner I.Ya. Design and calculation of friction supports. M.: Mechanical Engineering, 1971. – 168 p.
22. Korneev A.Yu., Savin L.A., Solomin O.V. Mathematical model of non-isothermal turbulent flow of lubricant in conical bearings of liquid friction // Bulletin of Mashinostroeniya, 2005. – No. 7. – P. 37 – 42.
23. Korneev A.Yu., Savin L.A., Solomin O.V. Tapered fluid friction bearings: monograph. M: Mechanical Engineering-1, 2008. – 172 p.

**Korneev Andrey Yurievich**

Orel State University,  
Associate Professor of the Department Mechatronics,  
Mechanics and Robotics  
302020, Orel, Moskovskaya, 34  
E-mail: korneev\_andrey@mail.ru

**Serebrennikov Artem Dmitrievich**

Orel State University  
Student of the Department Mechatronics, Mechanics and  
Robotics  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: silver57@mail.ru

**Sytin Anton Valerievich**

Orel State University,  
Associate Professor of the Department Mechatronics,  
Mechanics and Robotics  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: sitin@mail.ru

**Sukhoruchko Alexey Valerievich**

ООО NTC "APM"  
Head of Strength Calculations Department  
302020, Orel, Naugorskoe highway, 5  
E-mail: sukhорuchko@apm.ru

М.Э. БОНДАРЕНКО, Р.Н. ПОЛЯКОВ, А.Д. СЕРЕБРЕННИКОВ, К.В. СМЕРНОВА

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АКТИВНЫХ КОМБИНИРОВАННЫХ ОПОР

**Аннотация.** В статье представлены результаты экспериментальных исследований динамических характеристик ротора в активных комбинированных опорах. Представлен экспериментальный стенд для исследования комбинированных подшипников с активным управлением. Приведена методика обработки результатов экспериментальных исследований. Представлены графики экспериментальных зависимостей демпфирования и жесткости комбинированных опор.

**Ключевые слова:** ротор, комбинированный подшипник, демпфирование, жесткость, динамика роторной системы.

### Введение

Одна из основных задач современного машиностроения – создание высокоскоростных роторных машин и турбоагрегатов. Основной проблемой, связанной с ее решением является повышенная амплитуда колебаний ротора при приближении частоты вращения к критическим частотам, в связи, с чем переход через первую критическую частоту вызывает большие затруднения. Использование комбинированных опор с возможностью изменения динамических характеристик во время работы является одним из решений данной проблемы.

Интерес к комбинированным подшипникам появился в 1960-1970 годах [1, 2]. В 1980-ых НАСА проводила несколько научно-исследовательских программ по исследованию комбинированных подшипников [3, 4]. Данные исследования продемонстрировали преимущества комбинированных подшипников и возможности их применения в турбомашиностроении. В настоящее время существуют две принципиально различные конструкции комбинированных подшипников. Это конструкция разделения нагрузки и разделения скорости [5-8]. Исследуемая автором комбинированная опора с активным управлением представляет собой конструкцию с разделением скорости и представлена на рисунке 1.

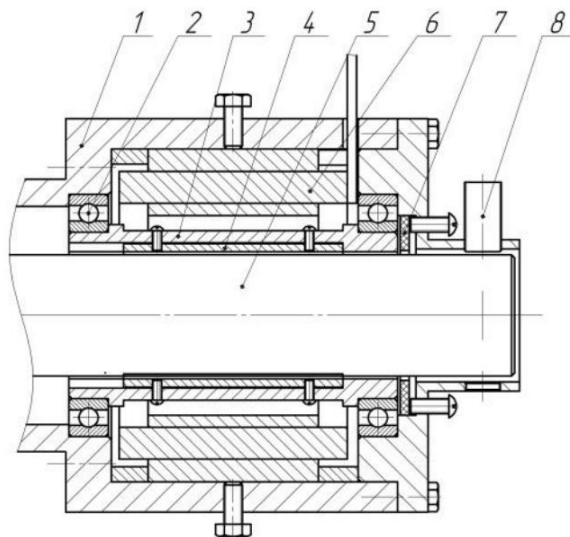


Рисунок 1 - Комбинированная опора с активным управлением

Исследуемая комбинированная опора состоит из корпуса 1, в котором установлены подшипники качения 2 с втулкой 3 с упругими металлическими лепестками 4, образующими многолепестковый газодинамический подшипник скольжения. В подшипнике скольжения установлен ротор 5. Вокруг подшипника скольжения в корпусе 1 установлен электромагнит 6. Для стопорения внутреннего кольца подшипника качения 2 установлен пьезоактуатор 7. Токовихревые датчики 8 снимают показания радиальных перемещений вала во

взаимноперпендикулярных направлениях. Принцип работы опоры описан в предыдущих работах автора [9-13].

Наличие активного управления, реализованного путем изменения напряжения, подаваемого на электромагнитные катушки, позволяет изменять радиальный зазор многолепесткового газодинамического подшипника, что в свою очередь влияет на жесткость и демпфирующие свойства всего узла и позволяет изменить собственные частоты ротора.

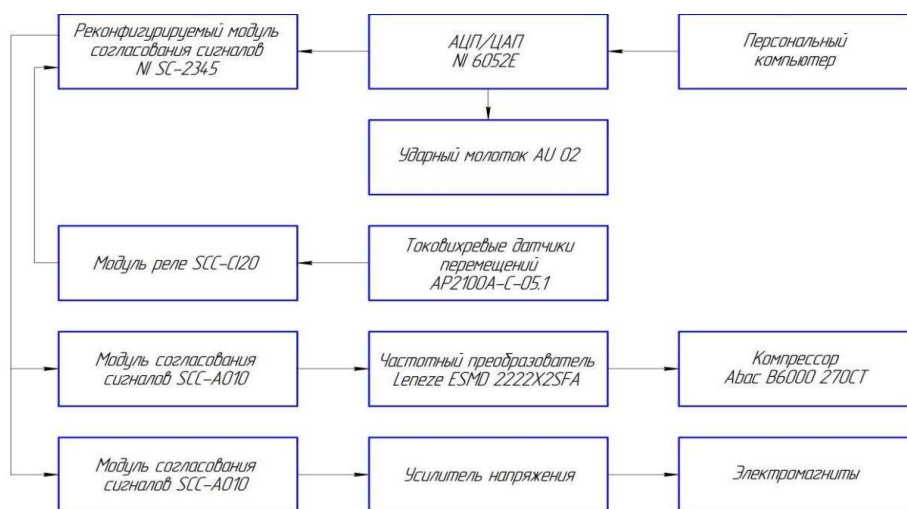
### Основная часть

На рисунке 2 представлен экспериментальный стенд с турбинным приводом для исследования комбинированных подшипников с активным управлением.



**Рисунок 2 - Экспериментальный стенд с турбинным приводом для исследования комбинированных подшипников с активным управлением**

Экспериментальный стенд состоит из компрессора 1, присоединенного к раструбу газотурбинного привода 2. Газотурбинный привод крепится на станину 3. В корпусах 4 установлены исследуемые комбинированные подшипниковые узлы с активным управлением. Токовихревые датчики 5 снимают показания радиальных перемещений ротора во взаимноперпендикулярных направлениях. Датчик 6 снимает показания частоты вращения ротора. Информационно-измерительная система экспериментального стенда состоит из персонального компьютера, в котором установлена плата АЦП/ЦАП National Instruments 6052E, реконфигурируемый модуль согласования сигналов SC2345, модулей согласования SCC-CI20 и SCC-AO10 и первичных преобразователей (рисунок 3).



**Рисунок 3 - Структура информационно-измерительной системы экспериментального стенда**

Программное обеспечение информационно-измерительной системы испытательного стенда включает три модуля: модуль управления силовыми агрегатами испытательного

стенда, модуль сбора экспериментальных данных и модуль обработки экспериментальных данных

В соответствии с теорией инженерного эксперимента [14, 15] были разработаны планы проведения экспериментальных исследований. Динамическая структура, включающая в себя ротор с активными комбинированными подшипниками, как объект экспериментального исследования является весьма сложной многофакторной системой. К управляющим факторам, определяющим поведение исследуемого объекта, относятся как конструктивные и геометрические характеристики ротора (его инерционные и упругие свойства, число и расположение опор и т.д.) и комбинированного подшипника (тип подшипника качения, тип подшипника скольжения, вид актуаторов, длина и диаметр, зазор и т.д.), так и рабочие параметры динамического процесса (скорость вращения ротора, статическая и ударная нагрузки, плотность и вязкость смазочного материала, давление и температура его подачи и другие параметры).

Управляемыми параметрами (функциями отклика), характеризующими работоспособность эффективность роторно-опорного узла с динамической точки зрения, являются: траектории движения центра цапфы, коэффициенты жесткости и демпфирования, амплитудно-частотные характеристики, и т.д. При проведении эксперимента в первую очередь в качестве выходных параметров выступали радиальные перемещения цапф (X и Y), величина прикладываемой динамической и статической нагрузки и др. Любая роторная система представляет собой сложную многофакторную систему с большим числом управляющих параметров. Учет всех возможных сочетаний представляется невозможным и нецелесообразным. Учитывая огромную трудоемкость и стоимость проведения экспериментальных исследований по изучению влияния всех факторов, определяющих динамику ротора, были отобраны следующие факторы: статическая и ударная нагрузки; частота вращения ротора; напряжение, подаваемое на электромагнитные катушки. Диапазоны измерения этих параметров определяются рабочими характеристиками экспериментального стенда и приведены в табл. 1.

Таблица 1 - Управляющие параметры активного комбинированного подшипника

№	Управляющий параметр	Размерность	Диапазон измерений	Число уровней
1	Частота вращения, $n$	об/мин	2000...30000	15
2	Статическая нагрузка, $F_{ст}$	Н	0...2000	9
3	Ударная нагрузка, $F_{дин}$	Н	100...500	5
4	Напряжение на электромагнитных катушках, $U$	В	0...200	5

После определения функций отклика (выходных параметров), выбора варьируемых факторов и их уровней было проведено планирование эксперимента [16, 17] с учетом специфики объекта исследования [18-20]. Среди основных целей планирования как этапа проведения эффективного эксперимента были следующие: минимизация времени проведения эксперимента, его стоимости и ошибок измерения при получении максимально возможной информации и максимальном контроле за внешними и посторонними воздействиями. Проведение экспериментальных исследований в соответствии с таблицей 1 привело к необходимости планирования многофакторного эксперимента. При планировании эксперимента вследствие большей точности и меньших затрат времени использовался факторный план, когда все уровни одного фактора комбинируются со всеми уровнями остальных [17]. К примеру, при необходимости учета влияния всех факторов на всех уровнях имеем полный факторный эксперимент вида

$$n_1 \times n_2 \times n_4 = 15 \times 9 \times 5 = 675 \text{ для статического нагружения и}$$

$$n_1 \times n_3 \times n_4 = 15 \times 5 \times 5 = 375 \text{ – для динамического нагружения,}$$

где  $n$  с соответствующим индексом обозначает число уровней каждого фактора.

Таким образом, проведение всего эксперимента по изучению влияния статического ( $n_{стат}$ ) и динамического ( $n_{дин}$ ) нагружений требует проведения общего числа опытов, равного

$n\Sigma = n_{\text{стат}} + n_{\text{дин}} = 1050$  опытов,

реализующих все возможные сочетания изменяемых параметров.

Также основой планирования экспериментальных исследований являются принципы репликации и рандомизации [17]. Принцип репликации заключается в повторении серий эксперимента при одном и том же сочетании управляющих факторов с целью оценки погрешности экспериментальных исследований. В настоящем исследовании было проведено 7 реплик, после чего в качестве результата бралось среднее арифметическое результатов этих повторов с предварительной проверкой на соответствие результата доверительному интервалу.

Рандомизация служит для распределения уровней управляющих факторов и установления порядка проведения опытов в случайном порядке. Проведение полнофакторного эксперимента с учетом всех возможных значений управляющих факторов является наиболее предпочтительным с точки зрения объективности получаемых данных. Однако практически такой эксперимент труднореализуем вследствие огромного количества опытов и временных затрат на их проведение. С учетом числа реплик каждой серии эксперимента проведение полнофакторного эксперимента становится нецелесообразным.

Для решения этой проблемы проводилось планирование частично-факторного эксперимента по методике, предложенной в [17]. Для минимизации влияния случайных воздействий, неконтролируемых при проведении опытов и не зависящих от их условий, выполнялась рандомизация проведения опытов. В качестве метода планирования экспериментальных исследований в данном случае был принят метод построения D-оптимальных планов, которые минимизируют обобщенную дисперсию рассеивания оценок коэффициентов регрессии и, тем самым, минимизируют взаимное влияние управляющих факторов друг на друга.

Математическую модель для данного эксперимента и принятого факторного плана можно представить в виде [16]:

$$X_{ijklm} = \mu + A_i + B_j + C_k + AB_{ij} + AC_{ik} + BC_{jk} + ABC_{ijk} + \varepsilon_{m(ijk)},$$

где  $X_{ijkl}$  – измеряемая величина (функция отклика) в  $m$ -ом наблюдении ( $m = \overline{1, 7}$ );

$\mu$  – общий эффект во всех наблюдениях (истинное среднее совокупности, из которой получена выборка);  $A_i$  – эффект фактора  $n$  на  $i$ -ом уровне ( $i = \overline{1, 15}$ );

$B_j$  – эффект фактора  $F_{\text{дин}}$  на  $j$ -ом уровне ( $j = \overline{1, 5}$ );

$C_k$  – эффект фактора  $U$  на  $k$ -ом уровне ( $k = \overline{1, 5}$ );

$\varepsilon_{m(ijk)}$  – случайная ошибка в эксперименте; остальные слагаемые, выраженные произведениями эффектов различных факторов, отражают взаимное влияние этих факторов друг на друга.

Методика определения динамических коэффициентов жесткости и демпфирования опорного узла состоит в том, чтобы одновременно измерить ударную нагрузку, создаваемую ударным молотком, время действия и приращение амплитуды колебаний, вызванное этим возмущением. В результате проведения опытов были получены развертки колебаний ротора с наложением по времени сигнала с ударного молотка (рисунок 4).

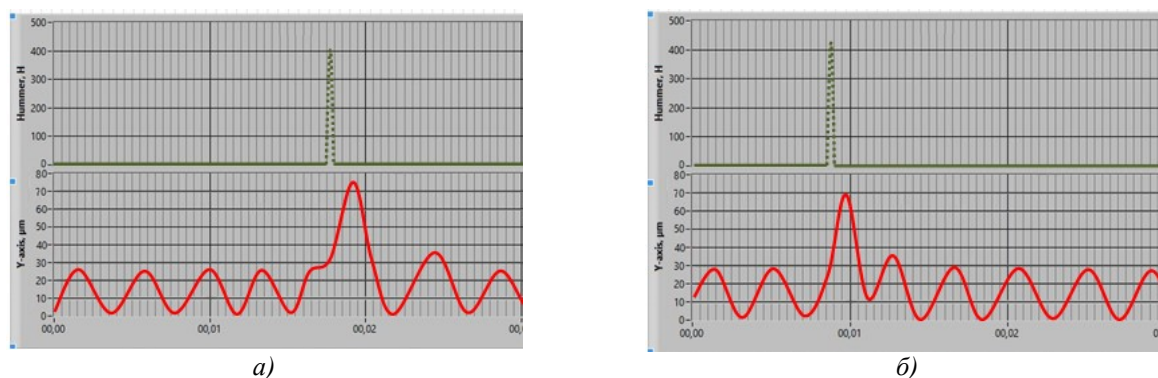


Рисунок 4 - Развертки колебаний ротора  $n = 14000$  об/мин,  $U = 200$  В



Из развертки колебаний ротора определяем величины  $F$  – значение ударной нагрузки и  $\Delta y$  – амплитуда колебаний по оси  $Y$  и находим значения коэффициента жесткости по формуле (1) и коэффициента демпфирования по формуле (2):

$$K = \frac{F}{\Delta y} \quad (1)$$

$$B = \frac{F \Delta t}{\Delta y} \quad (2)$$

Интерес представляет вопрос об исключении значений, резко выделяющихся по своей величине. Причинами таких грубых ошибок могут являться различные факторы. Эти результаты (резко отличающиеся значения) необходимо исключать, пользуясь статистическим критерием [21].

$$\bar{X} - g_{\alpha;n} S < X < \bar{X} + g_{\alpha;n} S, \quad (3)$$

где  $g_{\alpha;n}$  – критические значения, величины которых приведены в [16].

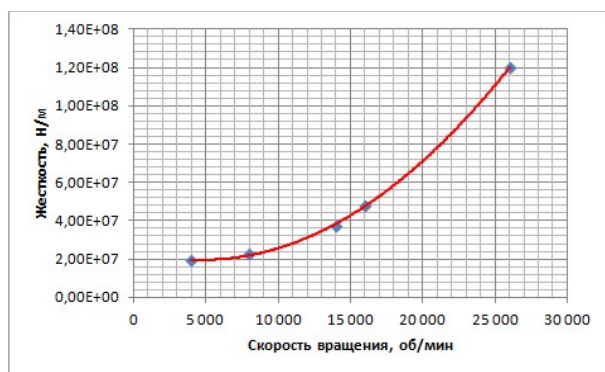


Рисунок 5 - Жесткость комбинированного подшипника с активным управлением 100 В,

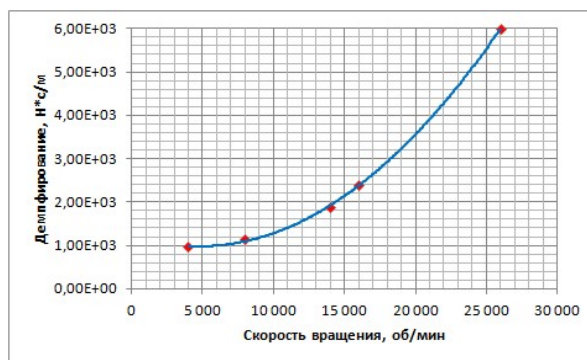
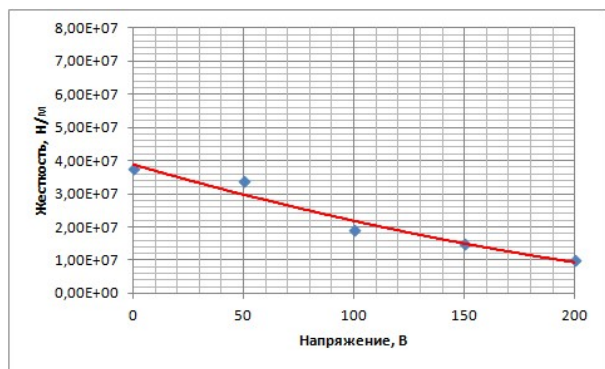
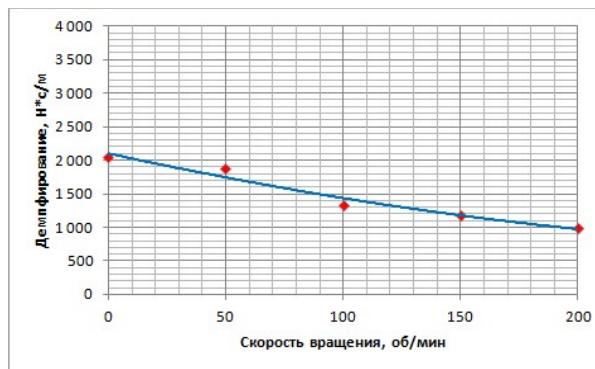


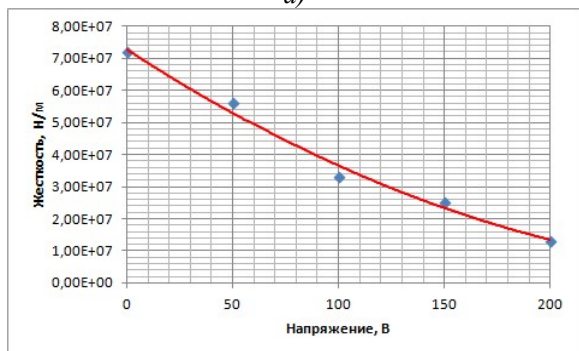
Рисунок 6 - Демпфирование комбинированного подшипника с активным управлением 100 В



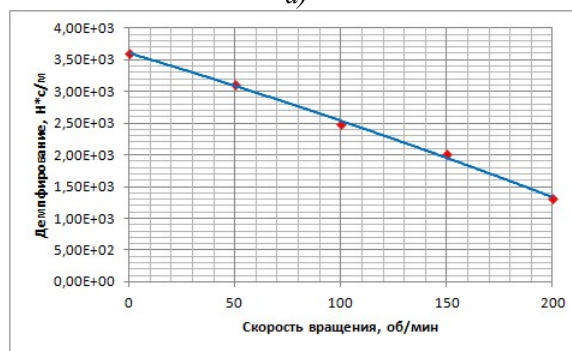
а)



а)



б)



б)

Рисунок 7- Жесткость комбинированного подшипника в зависимости от подаваемого напряжения на электромагнитные катушки:  
а –  $n = 14000$  об/мин; б –  $n = 20000$  об/мин

Рисунок 8 - Демпфирование комбинированного подшипника в зависимости от подаваемого напряжения на электромагнитные катушки:  
а –  $n = 14000$  об/мин; б –  $n = 20000$  об/мин

Также при обработке полученных экспериментальных данных был выявлен вид распределения случайной величины, который соответствовал нормальному распределению, что согласуется с центральной предельной теоремой [15].

Полученные показания жесткости (рисунок 5) и демпфирования (рисунок 6) комбинированного подшипника с активным управлением согласуются с результатами других авторов, представленных в научных работах в области исследования подшипников скольжения [22-24]. Также в результате экспериментальных исследований была выявлена возможность изменения жесткостных и демпфирующих характеристик в процессе всего цикла работы.

На рисунках 7 и 8 представлены графики изменения жесткости и демпфирования АКОР 1 в зависимости от подаваемого напряжения на электромагнитные катушки.

### Заключение

Из полученных результатов видно, что у комбинированного подшипника с активным управлением имеется возможность изменения жесткостных и демпфирующих характеристик. При переключении с подшипника качения на подшипник скольжения жесткость и демпфирование опорного узла меняется, что позволяет снизить виброактивность ротора. Данный эффект можно использовать для прохождения резонансных зон в роторных машинах, рабочие частоты вращения которых лежат за 2-ой и даже 3-ей критической частотой.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Non-contacting Finger Seal Developments and Design Considerations: Thermofluid and Dynamics Characterization, Experimental / M.J. Braun, H.M. Pierson, D. Deng // NASA/CP-2005-213655/V.1, – pp. 181–208.
2. 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 – Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №6 (350) – 2021. С.71 – 77.
3. Бондаренко, М.Э. Анализ экспериментальных исследований активной комбинированной опоры ротора / М.Э. Бондаренко, Р.Н. Поляков, М.А. Токмакова, А.Д. Серебренников // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №1(357) – 2023. С.133 – 140.
4. Майоров, С.В. Исследование динамики ассиметричного ротора в активных комбинированных опорах / С.В. Майоров, М.Э. Бондаренко, М.А. Токмакова, В.А. Позднякова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева – № 3 (353) -2022 – С. 73-82.
5. Бондаренко, М.Э. Комбинированный подшипниковый узел с изменяемыми жесткостными и демпфирующими характеристиками / М.Э. Бондаренко, Р.Н. Поляков, А.В. Горин, В.А. Позднякова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №5(355) – 2022. С.51 – 58.
6. Сытин, А.В. Расчет характеристик упорного лепесткового газодинамического подшипника совместным решением задач газодинамики и теории упругости / А.В. Сытин, С.А. Власова, А.Д. Серебренников, К.В. Смирнова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №5(361) – 2023. С.72 – 80.
7. Сытин, А.В. Расчет характеристик радиального лепесткового газодинамического подшипника с изменяемой геометрией опорной поверхности / А.В. Сытин, С.А. Власова, И.А. Серенко, А.Д. Серебренников // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №6(362) – 2023. С.108 – 116.
8. Родичев, А.Ю. Система мониторинга состояния узлов и агрегатов промышленного оборудования / А.Ю. Родичев, А.В. Горин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №6(362) – 2023. С.101 – 108.
9. Шутин, Д.В. Управление сервоклапанами для реализации активной смазки гидростатодинамических подшипников / Д.В. Шутин, К.К. Настепанин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №3(359) – 2023. С.137 – 144.
10. Шутин, Д.В. Анализ точности показаний датчиков перемещений при определении положения ротора в опорах жидкостного трения / Д.В. Шутин, А.С. Фетисов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №3(353) – 2022. С.103 – 110.
11. Горин, А.В. Анализ методов управления и классификаций для диагностирования аномальных состояний / А.В. Горин, Р.К. Зарецкий, А.К. Поздняков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №3(353) – 2022. С.59 – 67.
12. Фетисов, А.С. Экспериментальный анализ точности определения положения ротора в опорах жидкостного трения / А.С. Фетисов, Д.В. Шутин, М.Н. Сметанин, К.К. Настепанин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №6(356) – 2022. С.83 – 91.
13. Родичев, А.Ю. Исследование возможности применения искусственных нейронных сетей для диагностики роторно-опорных узлов / А.Ю. Родичев, Р.Н. Поляков, К.В. Васильев, Е.М. Минаева // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №6(356) – 2022. С.91 – 96.

14. Родичев, А.Ю. Экспериментальный узел лабиринтных уплотнений в мехатронных механизмах / А.Ю. Родичев, А.В. Внуков, И.В. Родичева, К.В. Васильев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №5(361) – 2023. С.59 – 65.
15. Джонсон Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке / Н. Джонсон, Ф. Лион. – Москва, 1981.
16. Лавренчик В.Н. Постановка физического эксперимента и статистическая обработка его результатов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 272 с.
17. Монтгомери Д.К. Планирование эксперимента и анализ данных. – Л.: Судостроение, 1980. – 384 с.
18. Bentley D.E. Fundamentals of rotating machinery diagnostics / D.E. Bentley, C.T. Hatch, B. Grissom. – Minden, NV: Bentley Pressurized Bearing Press, 2002. – 726 p.
19. Ehrich F. Handbook of rotordynamics. – McGraw-Hill, 1992. – 542 p.
20. Vance M.J. Rotordynamics of turbomachinery. – New York: John Wiley & Sons, 1988. – 322 p.
21. Хикс Ч. Основные принципы планирования эксперимента. – М.: Мир, 1967. – 408 с.
22. Meruane V. Identification of nonlinear dynamic coefficients in plain journal bearings / V. Meruane, R. Pascual // Tribology International. – ELSEVIER, 2008. – P.743-754.
23. Identification of Stiffness and Damping Coefficients of Aerostatic Journal Bearing / J. Konzaneck, J. Simek, P. Steinbauer, A. Bilkovsky // Engineering Mechanics. – 2009. – Vol. 16, №3. – P. 209-220.
24. Ravikovich Y.A. Prediction of Stiffness Coefficients for Foil Air Bearings to Perform Rotordynamic Analysis of Turbomachinery // Proceedings of the 9th IFTOMM International Conference on Rotor Dynamics Mechanisms and Machine Science. – 2015. – Vol. 21. – P. 1277-1288

**Бондаренко Максим Эдуардович**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел  
Доцент кафедры мехатроники, механики и  
робототехники  
302030, г. Орел, ул. Московская, 34  
E-mail: maxbondarenko22@yandex.ru

**Поляков Роман Николаевич**

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

**Серебренников Артем Дмитриевич**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел  
Студент кафедры мехатроники, механики и  
робототехники  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
E-mail: silver5793@mail.ru

**Смирнова Кристина Владимировна**

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

M.E. BONDARENKO, R.N. POLYAKOV, A.D. SEREBRENNIKOV, K.V. SMIRNOVA

## EXPERIMENTAL RESEARCH ON DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE ROTOR IN ACTIVE HYBRID BEARINGS

**Abstract.** *The article presents the results of experimental studies of the dynamic characteristics of the rotor in active combined supports. An experimental stand for studying combined bearings with active control is presented. A methodology for processing the results of experimental studies is presented. Graphs of experimental dependences of damping and stiffness of combined supports are presented.*

**Keywords:** *rotor, hybrid bearing, damping, stiffness, dynamics of the rotor system.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Non-contacting Finger Seal Developments and Design Considerations: Thermofluid and Dynamics Characterization, Experimental / M.J. Braun, H.M. Pierson, D. Deng // NASA/CP-2005-213655/V.1, – pp. 181–208.
2. Polyakov, R.N. Study of labyrinth seals in mechatronic mechanisms / R.N. Polyakov, A.V. Vnuikov, 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.
3. Bondarenko, M.E. Analysis of experimental studies of active combined rotor support / M.E. Bondarenko, R.N. Polyakov, M.A. Tokmakova, A.D. Serebrennikov // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 1 (357) – 2023. P. 133 – 140.
4. Mayorov S.V. Study of the dynamics of an asymmetric rotor in active combined supports / S.V. Mayorov, M.E. Bondarenko, M.A. Tokmakova, V.A. Pozdnyakova // Fundamental and applied problems of engineering and technology. – Orel: OSU named after I.S. Turgenev – No. 3 (353) 2022 – P. 73-82.
5. Bondarenko, M.E. Combined bearing unit with variable rigidity and damping characteristics / M.E. Bondarenko, R.N. Polyakov, A.V. Gorin, V.A. Pozdnyakova // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 5 (355) – 2022. P. 51 – 58.

6. Sytin, A.V. Calculation of characteristics of a thrust petal gas-dynamic bearing by joint solution of problems of gas dynamics and elasticity theory / A.V. Sytin, S.A. Vlasova, A.D. Serebrennikov, K.V. Smirnova // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 5 (361) – 2023. P. 72 – 80.
7. Sytin, A.V. Calculation of characteristics of a radial petal gas-dynamic bearing with variable geometry of the supporting surface / A.V. Sytin, S.A. Vlasova, I.A. Serenko, A.D. Serebrennikov // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 6 (362) – 2023. P. 108 – 116.
8. Rodichev, A.Yu. System for monitoring the condition of components and assemblies of industrial equipment / A.Yu. Rodichev, A.V. Gorin // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 6 (362) – 2023. P. 101 – 108.
9. Shutin, D.V. Control of servo valves for the implementation of active lubrication of hydrodynamic bearings / D.V. Shutin, K.K. Nastepanin // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 3 (359) – 2023. P. 137 – 144.
10. Shutin, D.V. Analysis of the accuracy of displacement sensor readings when determining the position of the rotor in fluid friction supports / D.V. Shutin, A.S. Fetisov // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 3 (353) – 2022. P. 103 – 110.
11. Gorin, A.V. Analysis of control methods and classifications for diagnosing anomalous conditions / A.V. Gorin, R.K. Zaretsky, A.K. Pozdnyakov // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 3(353) – 2022. P.59 – 67.
12. Fetisov, A.S. Experimental analysis of the accuracy of determining the rotor position in fluid friction supports / A.S. Fetisov, D.V. Shutin, M.N. Smetanin, K.K. Nastepanin // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 6 (356) – 2022. P. 83 – 91.
13. Rodichev, A.Yu. Study of the possibility of using artificial neural networks for the diagnosis of rotor-support units / A.Yu. Rodichev, R.N. Polyakov, K.V. Vasiliev, E.M. Minaeva // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 6 (356) – 2022. P. 91 – 96.
14. Rodichev, A.Yu. Experimental unit of labyrinth seals in mechatronic mechanisms / A.Yu. Rodichev, A.V. Vnukov, I.V. Rodicheva, K.V. Vasiliev // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 5 (361) – 2023. P. 59 – 65.
15. Johnson N. Statistics and experimental planning in technology and science / N. Johnson, F. Lyon. – Moscow, 1981.
16. Lavrenchik V.N. Setting up a physical experiment and statistical processing of its results. – M.: Energoatomizdat, 1986. – 272 p.
17. Montgomery D.K. Experimental design and data analysis. – L.: Shipbuilding, 1980. – 384 p.
18. Bentley D.E. Fundamentals of rotating machinery diagnostics / D.E. Bentley, C.T. Hatch, B. Grissom. – Minden, NV: Bentley Pressurized Bearing Press, 2002. – 726 p.
19. Ehrich F. Handbook of rotordynamics. – McGraw-Hill, 1992. – 542 p.
20. Vance M.J. Rotordynamics of turbomachinery. – New York: John Wiley&Sons, 1988. – 322 p.
21. Hicks Ch. Basic principles of experiment planning. – M.: Mir, 1967. – 408 p.
22. Meruane V. Identification of nonlinear dynamic coefficients in plain journal bearings / V. Meruane, R. Pascual // Tribology International. – ELSEVIER, 2008. – P.743-754.
23. Identification of Stiffness and Damping Coefficients of Aerostatic Journal Bearing / J. Konzanek, J. Simek, P. Steinbauer, A. Bilkovsky // Engineering Mechanics. – 2009. – Vol. 16, no. 3. – P. 209-220.
24. Ravikovich Y.A. Prediction of Stiffness Coefficients for Foil Air Bearings to Perform Rotordynamic Analysis of Turbomachinery // Proceedings of the 9th IFToMM International Conference on Rotor Dynamics Mechanisms and Machine Science. – 2015. – Vol. 21. – P. 1277-1288

**Bondarenko Maxim Eduardovich**

Orel State University,  
Associate Professor of the Department Mechatronics,  
Mechanics and Robotics  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: maxbondarenko22@yandex.ru

**Serebrennikov Artem Dmitrievich**

Orel State University  
Student of the Department Mechatronics, Mechanics and  
Robotics  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: silver57@mail.ru

**Polyakov Roman Nikolaevich**

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

**Smirnova Kristina Vladimirovna**

Orel State University,  
Student of the Department Mechatronics, Mechanics and  
Robotics  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: kristinka\_boom@mail.ru

© М.Э. Бондаренко, Р.Н. Поляков, А.Д. Серебренников, К.В. Смирнова, 2024

М.Э. БОНДАРЕНКО, А.Ю. РОДИЧЕВ, К.В. СМИРНОВА, И.В. РОДИЧЕВА, К.В. ВАСИЛЬЕВ

## ВЛИЯНИЕ ТВЕРДЫХ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ В ОПОРАХ СКОЛЬЖЕНИЯ

**Аннотация.** В статье представлен краткий анализ условий и режимов работы подшипников скольжения. Дано описание кривой Герси-Штрибека применительно к выбегу ротора в опорах скольжения. Выведена зависимость максимального коэффициента трения по результатам экспериментальных исследований. Показаны и описаны графики зависимости коэффициента трения от времени для поверхности подшипника, обработанной антифрикционным покрытием Molykote, и поверхности подшипника скольжения, выполненной из бронзы БрОФ10. Сделаны выводы и даны рекомендации по применению твердого антифрикционного покрытия Molykote.

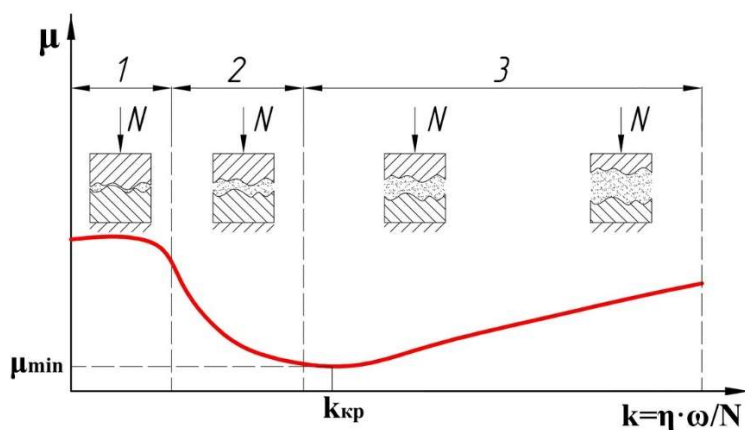
**Ключевые слова:** ротор, подшипник скольжения, антифрикционное покрытие, коэффициент трения.

### Введение

Подшипники скольжения работают в различных режимах трения, зависящих от многих факторов. Одним из них является скорость вращения вала, на котором установлен подшипник. При низких скоростях вращения вала подшипник работает в режиме граничного трения, при котором поверхность вала и подшипника разделяет очень тонкая масляная пленка. Это обеспечивает минимальное трение и износ деталей. С повышением скорости вращения вала режим работы подшипника меняется на гидродинамический. В этом случае масляная пленка между валом и подшипником становится более толстой и начинает играть роль своеобразного подшипника. Благодаря этому силе трения между деталями значительно уменьшается, что позволяет увеличить скорость вращения и продлить срок службы подшипника. Однако при дальнейшем увеличении скорости вращения вала наступает режим полужидкостного трения, когда масляная пленка уже не может полностью разделить поверхности вала и подшипника. В результате трение становится больше, что может привести к перегреву подшипника и выходу его из строя [1, 2, 3, 4, 5].

### Основная часть

Анализ условий работы подшипников скольжения отчетливо представлен на диаграмме Герси-Штрибека. Эта диаграмма отображает зависимость коэффициента трения от характеристики режима работы подшипника. Данная характеристика представляет собой сочетание параметров, включая вязкость смазочного материала, угловую скорость вращения вала и удельную нагрузку на подшипник. Классический вид диаграммы Герси-Штрибека представлен на рисунке 1



**Рисунок 1 - Диаграмма Герси-Штрибека:**

1 – граничный режим смазки; 2 – полужидкостный режим (смешанный);  
3 – жидкостный (гидродинамический) режим смазки

На диаграмме Герси-Штрибека выделены три режима смазки подшипников: гидродинамическая, полужидкостная и смешанная. В гидродинамическом режиме поверхности разделяет слой масла, в полужидкостной - коэффициент трения минимальный, а в смешанной режиме происходит контакт между неровностями. При работе в смешанной режиме увеличивается трение и износ, повышается температура, происходит износ

неровностей и изменение шероховатости. Это приводит к процессу приработки деталей и стабилизации их состояния при постоянных условиях. Дальнейшее уменьшение значения характеристики, например, из-за увеличения нагрузки, ведет к сближению поверхностей трения и увеличению числа контактирующих микронеровностей. Это вызывает рост коэффициента трения, повышение температуры и сопровождается упругими и пластическими деформациями микронеровностей трущихся поверхностей, их износом и сглаживанием [6, 7, 8, 9]. Длительная работа подшипника в этом режиме приводит к изменению шероховатости трущихся поверхностей. Если отсутствуют факторы, способствующие дальнейшему снижению значения характеристики подшипника  $k$  (число Герси), трущиеся поверхности прирабатываются и подшипник переходит в режим жидкостной смазки с минимальным коэффициентом трения, то есть происходит приработка трущихся поверхностей [10, 11, 12, 13, 14].

Граничный режим смазки подшипника – это когда поверхности подшипника контактируют через тонкий слой смазочного материала с особыми свойствами. Этот слой обеспечивает упруго-пластичное взаимодействие микронеровностей с интенсивным выделением тепла. В определенных условиях, например, при достижении критической температуры, этот слой может разрушиться, что приведет к контакту металлических поверхностей и началу процесса схватывания. Это может привести к отделению частиц материала и негативным последствиям для подшипника.

Критические значения параметра  $k_{кр}$  и минимальный коэффициент трения  $\mu_{min}$  определяют положение графика Герси-Штрибека и зависят от множества факторов: геометрии подшипника, качества поверхности трения, наличия загрязнений и примесей в смазочном материале, наличия поверхностно активных веществ в смазке и наличия покрытий на трущихся поверхностях.

Также на режим работы подшипников влияют материалы, из которых изготовлены вал и сам подшипник, вязкость и качество смазки, температура окружающей среды и другие факторы. Поэтому при выборе подшипников и смазочных материалов необходимо учитывать все эти параметры, чтобы обеспечить оптимальный режим трения и максимальный срок службы подшипников [15, 16, 17].

Применение антифрикционных покрытий является перспективным вопросом в связи с тем, что простые материалы не могут обеспечить заданные свойства контактирующих при вращении поверхностей, в частности требуемый коэффициент трения в паре вращения вал – подшипник скольжения. Исследования, направленные на определения свойств твердых антифрикционных покрытий, являются чрезвычайно актуальными, так как позволят определить влияние покрытий на кинематические характеристики движения вала [18, 19, 20, 21, 22].

Эксперимент проводился по одномерно-одномерной схеме, когда на объект воздействует только один изменяющийся фактор – материал втулки, и поведение объекта оценивается по одному показателю – времени остановки вала. Интересующие нас переменные являются только функциями времени.

Средние выборочные значения скорости вращения вала для каждого момента времени определяется по формуле:

$$\bar{y}_{ib} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}, \quad (1)$$

где  $\bar{y}_{ib}$  – среднее экспериментальное значение скорости вращения, об/мин;

$y_i$  – значения экспериментального исследуемого параметра, скорости вращения вала, об/мин;

$n$  – число опытов в одной серии.

Значения дисперсии для каждой серии опытов рассчитанные по формуле:

$$S_j^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_b)^2, \quad (2)$$

Среднеквадратические отклонения, равны корню квадратному из дисперсий:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_b)^2}, \quad (3)$$

Среднеквадратические отклонения — показатель рассеивания значений случайной величины относительно её математического ожидания. Полученное значение коэффициента вариации, то есть отношение стандартного (среднеквадратичного) отклонения случайной величины к её математическому ожиданию, выраженное в процентах:

$$V = \frac{\sigma}{\bar{y}_{ib}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

Данное выражение показывает, что колебания экспериментальных значений скорости составляет порядка 22 % для антифрикционных покрытий Molykote.

Чем меньше показатель вариации, тем более процесс устойчивый, а значит, и более предсказуемый.

Средне линейное отклонение рассчитывается по формуле:

$$a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_b), \quad (5)$$

Этот показатель характеризует меру разброса значений вокруг их среднего.

Полученные результаты расчетов статистических характеристик экспериментальных данных заносим в таблицу 1.

Таблица 1 - Антифрикционное покрытие Molykote

Время, с	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Среднее арифметическое $n$ , об/мин	1492,5	1242	1027	805,6	629,8	469,3	343,5	242,9	168,4	0
Дисперсия	4,7	24050	25574	13775	13624	11655	5964	2883,4	998	0
Среднеквадратичное отклонение	2,17	155,1	159,9	117,4	116,7	107,9	77,2	53,7	31,6	0
Коэффициент вариации, %	0,15	12,5	15,6	14,6	18,5	23,1	22,4	22,1	18,8	0
Среднее линейное отклонение	1,7	130,6	128,7	95,9	89,6	85,0	58,6	44,0	23,3	0

Для исследования корреляционной зависимости между скоростью вращения вала и вот времени был проведен регрессионный анализ. Исследовалась линейная регрессия, квадратичная и кубическая регрессия.

Уравнение линейной регрессии имеет вид:

$$\hat{y} = ax + b, \quad (6)$$

где  $\hat{y}$  — теоретическое значение исследуемого параметра.

Коэффициенты вычисляются по формулам:

$$a = \frac{\sum x_i \sum y_i - n \sum x_i y_i}{(\sum x_i)^2 - n \sum x_i^2}, \quad (7)$$

$$b = \frac{\sum x_i \sum x_i y_i - \sum x_i^2 \sum y_i}{(\sum x_i)^2 - n \sum x_i^2}, \quad (8)$$

Для оценки значимости параметров регрессия и корреляции был вычислен коэффициент линейной парной корреляции и детерминации:

$$r_{xy} = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{(n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2)(n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2)}}, \quad (9)$$

Рассчитана средняя ошибка аппроксимации:

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \cdot 100\%, \quad (10)$$

где  $\hat{y}$  - теоретически рассчитанный значения по уравнению регрессии.

С помощью Критерия Фишера оценено качество регрессионной модели. Если табличный критерий Фишера больше фактического признается не значимость регрессионной модели. Для линейной регрессии критерий фактический Фишера рассчитывается по формуле:



$$F_{fakt} = \frac{r_{xy}^2}{1 - r_{xy}^2} (n - 2), \quad (11)$$

Табличный критерий Фишера определяем по таблицам из справочного источника при уровне значимости 0,05 и степенях свободы  $k_1 = 1$ ,  $k_2 = n - 2$ .

Коэффициенты квадратичной и кубической регрессий  $y = ax^2 + bx + c$ ,  $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$  определялись с помощью системы уравнений:

$$\begin{cases} a \sum x_i^2 + b \sum x_i + nc = \sum y_i \\ a \sum x_i^3 + b \sum x_i^2 + c \sum x_i = \sum x_i y_i \\ a \sum x_i^4 + b \sum x_i^3 + c \sum x_i^2 = \sum x_i^2 y_i \end{cases}$$

$$\begin{cases} a \sum x_i^3 + b \sum x_i^2 + c \sum x_i + nd = \sum y_i \\ a \sum x_i^4 + b \sum x_i^3 + c \sum x_i^2 + d \sum x_i = \sum x_i y_i \\ a \sum x_i^5 + b \sum x_i^4 + c \sum x_i^3 + d \sum x_i^2 = \sum x_i^2 y_i \\ a \sum x_i^6 + b \sum x_i^5 + c \sum x_i^4 + d \sum x_i^3 = \sum x_i^3 y_i \end{cases}$$

Решение системы уравнений осуществлялась методом Крамера.

Рассчитанный индекс корреляции оценивает значимость параметров квадратичного уравнения регрессии:

$$F_{fakt} = \frac{r_{xy}^2}{1 - r_{xy}^2} (n - 2), \quad (12)$$

Квадрат этой статистической меры показывает, насколько хорошо регрессионная модель описывает данные.  $R^2$  равный единицы, означает что функция идеально ложится на все точки — данные идеально скоррелированы.

На рисунках 2 – 4 представлены диаграммы экспериментальных исследование и график полученного уравнения регрессии.

Таблица 2 - Параметры значимости уравнений регрессии

		линейная регрессия	квадратичная регрессия	кубическая регрессия
Индекс корреляции		-0,9855	0,9999	0,9999
Средняя ошибка аппроксимации, %		16,13	0,7	0,6
Критерий Фишера	Таб.	5,6	5,1	5,4
	Фак.	236,8	18562	17974

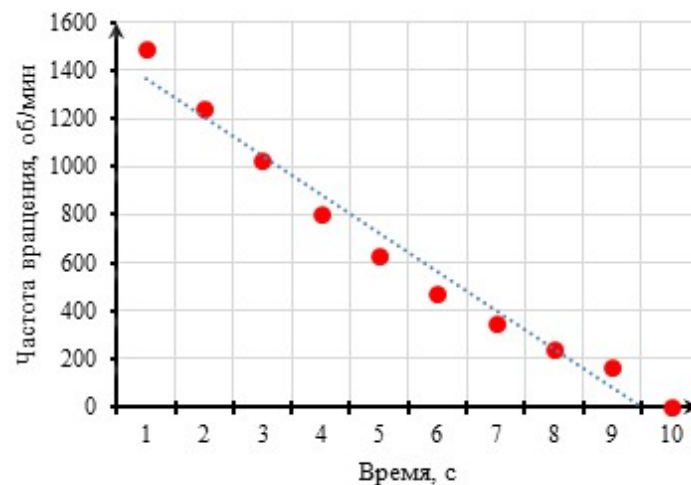


Рисунок 2 - Диаграмма рассеяния экспериментальных значений и график уравнения линейной регрессии ( $y = -166,63x + 1546,83$ )

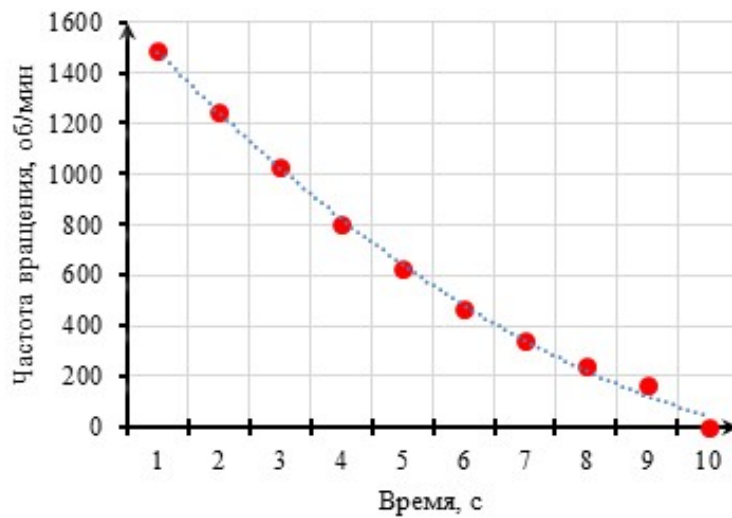


Рисунок 3 - Диаграмма рассеяния экспериментальных значений и график уравнения квадратичной регрессии ( $y = 12,61x^2 - 292,74x + 1778,02$ )

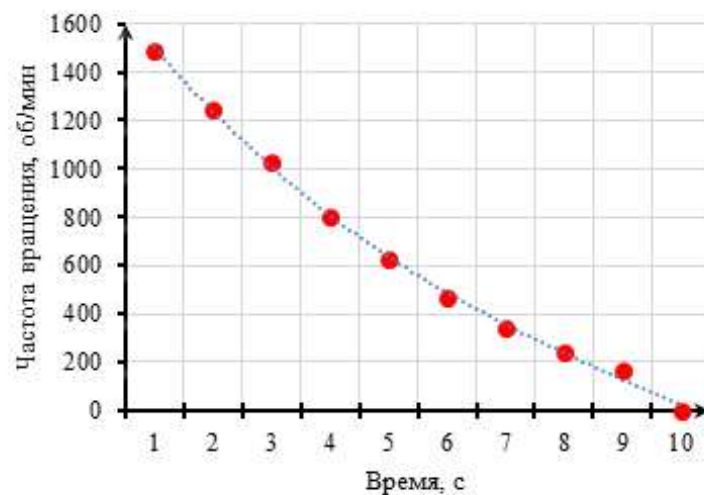


Рисунок 4 - Диаграмма рассеяния экспериментальных значений и график уравнения кубической регрессии ( $y = 0,288x^3 + 8,29x^2 - 274,54x + 1759,02$ )

Сравнительный анализ параметров значимости регрессии, представленных в таблице 2, показал, что в нашем случае больше подходит – кубическая зависимость:

$$y_{III} = 0,288x^3 + 8,29x^2 - 274,54x + 1759,02,$$

где  $y$  – частота вращения вала, об/мин;

$x$  – отрезок времени после остановки двигателя, с.

Угловая скорость вращения вала рассчитывается как:

$$\omega = \frac{2\pi n_e}{60}, \quad (13)$$

где  $n_e$  – частота вращения вала, об/мин.

Таким образом, мы имеем уравнения изменения угловой скорости вращения вала от времени:

$$\omega_{III} = 0,03t^3 + 0,87t^2 - 28,83t + 184,7 \quad (14)$$

Продифференцировав, полученные уравнения регрессии, получим уравнение зависимости углового ускорения от времени:

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = \frac{\pi dn_e}{30dt} \quad (15)$$

Уравнения углового ускорения:

$$\varepsilon_{III} = \frac{d\omega_{III}}{dt} = 0,09t^2 + 1,74t - 28,73 \quad (16)$$

Уравнение вращательного движения вала при его торможении имеет вид:

$$J_z \frac{d\omega}{dt} = -M_{mp}, \quad (17)$$

где  $J_z$  – момент инерции массы вала с насаженными дисками относительно оси вращения, кг·м<sup>2</sup>,

$M_{тр}$  – момент силы трения в опоре.

Функция уравнения момента трения запишется в виде:

$$M_{mpIII} = J_z(28,73 - 1,74t - 0,09t^2) \quad (18)$$

Осевой момент инерции можно  $J_z$  сосчитать как сумма момента инерции сплошного вала  $J_{z\phi}$ , цапф вала  $J_{zu}$  и насаженных дисков  $J_{z\phi}$ .

$$J_z = J_{z\phi} + J_{zu} + J_{z\phi} \quad (19)$$

Для сплошного однородного вала осевой момент инерции определяется по формуле:

$$J_{z\phi} = \frac{m_{\phi} R_{\phi}^2}{2} \quad (20)$$

где  $m_{\phi}$  – масса вала, кг;

$R_{\phi}$  – радиус вала, м.

Для детали в форме диска:

$$J_{zu} = \frac{m_u (R_u^2 - r_u^2)}{2} \quad (21)$$

$$J_{z\phi} = \frac{m_{\phi} (R_{\phi}^2 - r_{\phi}^2)}{2} \quad (22)$$

Внутренний радиус цапф и дисков принимаем равным радиусу вала:

$$r_u = r_{\phi} = R_{\phi} \quad (23)$$

Момент силы трения в опоре считается как произведение силы трения на диаметр вала:

$$M_{mp} = F_{mp} \cdot R_{\phi} = f \cdot N \cdot R_{\phi} \quad (24)$$

где  $N$  – нормальная реакция поверхности вал-втулка.

По второму закону Ньютона:

$$m\bar{a} = \sum \bar{F} \quad (25)$$

Тогда, в проекциях на ось сонаправленную с центростремительным ускорением (рисунок 5) закон запишется как:

$$ma_u = N_1 - mg \quad (26)$$

$$ma_u = N_2 \quad (27)$$

$$ma_u = N_3 + mg \quad (28)$$

$$ma_u = N_4, \quad (29)$$

где  $a_u$  – центростремительное ускорение, равное:

$$a_u = \omega^2 R_u \quad (30)$$

Таким образом, при вращении вала сила давления вала на поверхность втулки зависит от скорости вращения вала, при этом:

$$N_1 = m(g + R_u \omega^2) \quad (31)$$

$$N_2 = N_4 = mg \quad (32)$$

$$N_3 = m(R_u \omega^2 - g) \quad (33)$$

Коэффициент трения является функцией момента сил трения и силы нормальной реакции:

$$f = \frac{-M_{mp}}{R_u \cdot N} = \frac{J_z \frac{d\omega}{dt}}{R_{\phi} \cdot m(g \pm R_{\phi} \omega^2)} \quad (34)$$

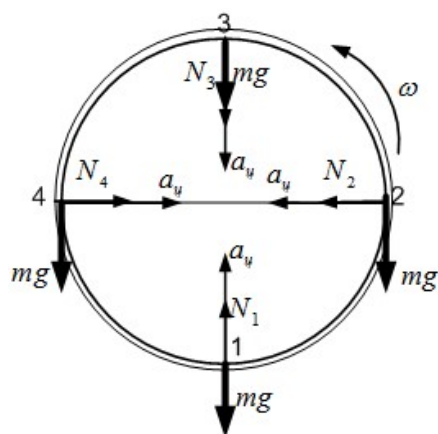


Рисунок 5 - Распределение сил давлений при вращении вала с цапфой

Функция зависимости максимального коэффициента трения для серий опытов будет иметь вид:

$$f_{III} = \frac{J_z(0,09t^2 + 1,74t - 28,73)}{R_y m(g + (0,03t^3 + 0,87t^2 - 28,83t + 184,7)^2)} \quad (35)$$

В экспериментальной установке использовался вал диаметром 17 мм, массой 0,95 кг, две цапфы вала с внешним диаметром 40 мм общей массой 2,39 кг и два диска с внешним диаметром 120 мм и общей массой 2,355, внутренний диаметр цап и дисков принимаем равный 17 мм, тогда осевой момент инерции системы относительно оси вращения равно 45,5 кг·см<sup>2</sup>.

График функции зависимости максимального коэффициента трения для серий опытов представлен на рисунке 6.

Выявленные зависимости коэффициента трения за время свободного выбега ротора показывают хорошую корреляцию с кривой Герси-Штрибека. Это дает возможность говорить о достоверности полученных результатов. Полученные зависимости иллюстрируют эффект снижения коэффициента трения для поверхности с покрытием Molykote в сравнении с поверхностью подшипника, выполненного из бронзы БрОФ10 на всем периоде выбега вплоть до 21,2%.

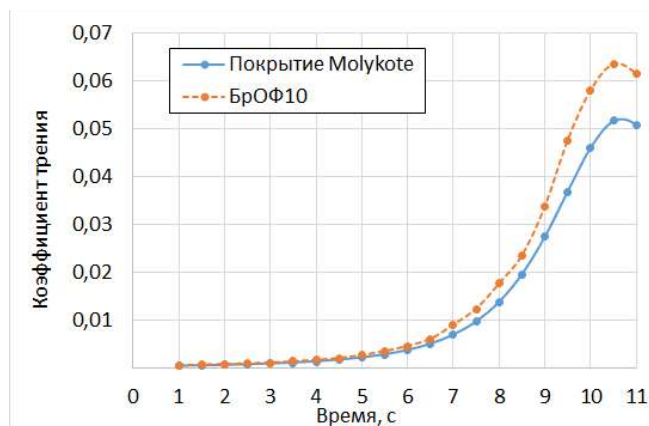


Рисунок 6 - График зависимости коэффициента трения от времени

### Заключение

Анализ полученных результатов дает возможность сделать следующие выводы:

- полученное уравнение расчёта коэффициента трения позволяет достаточно точно рассчитать коэффициент трения в требуемый момент выбега ротора;
- полученный график зависимости коэффициента трения от времени достаточно точно совпадает с формой кривой Герси-Штрибека;
- применение антифрикционного покрытия на поверхности подшипника скольжения позволяет снизить коэффициент трения до 21,2%;
- данный эффект позволяет существенно увеличить работоспособность подшипникового узла и количество пусков-остановов;

– вышеперечисленные факты доказывают перспективность применения твердых антифрикционных покрытий, на примере покрытия Molykote, для увеличения ресурса работы подшипниковых узлов.

*Статья выполнена в рамках проекта государственного задания FSGN-2024-0004 «Лаборатория интеллектуальных технологий мониторинга и предиктивного диагностирования критически важных узлов энергогенерирующего оборудования».*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дроздов Ю.Н., Юдин Е.Г., Белов А.И. Прикладная трибология (трение, износ, смазка) / Под ред. Ю.Н. Дроздова. – М.: «Эко-Пресс», 2010. – 604 с.
2. Захаров, С.М., Буяновский И.А. Смазка // В кн. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун и др.; Под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – с. 184-248.
3. Буяновский, И.А. Граничная смазка // В кн. «Современная трибология: итоги и перспективы» / Под ред. К.В. Фролова. – М.: Изд-во ЛКИ. – 2008, 226-278.
4. Родичев, А.Ю. Исследование возможности применения искусственных нейронных сетей для диагностики роторно-опорных узлов / А.Ю. Родичев, Р.Н. Поляков, К.В. Васильев, Е.М. Минаева // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №6(356) – 2022. С.91 – 96.
5. Горин, А.В. Анализ методов управления и классификаций для диагностирования аномальных состояний / А.В. Горин, Р.К. Зарецкий, А.К. Поздняков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №3(353) – 2022. С.59 – 67.
6. Венцель С.В., Лелюк В.А. Результаты исследования приработки пар трения. – В сб.: Теория смазочного действия и новые материалы, М.: Наука, 1965, с. 81-85.
7. Бондаренко, М.Э. Анализ экспериментальных исследований активной комбинированной опоры ротора / М.Э. Бондаренко, Р.Н. Поляков, М.А. Токмакова, А.Д. Серебренников // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №1(357) – 2023. С.133 – 140.
8. Фетисов, А.С. Экспериментальный анализ точности определения положения ротора в опорах жидкостного трения / А.С. Фетисов, Д.В. Шутин, М.Н. Сметанин, К.К. Настепанин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №6(356) – 2022. С.83 – 91.
9. Родичев, А.Ю. Экспериментальный узел лабиринтных уплотнений в мехатронных механизмах / А.Ю. Родичев, А.В. Внуков, И.В. Родичева, К.В. Васильев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №5(361) – 2023. С.59 – 65.
10. Денисов, А.С. Влияние условий смазки на толщину масляного слоя в шатунных подшипниках дизельного двигателя / А.С. Денисов, И.К. Данилов // Вестник СГТУ. – 2005. – № 4 (9). – С. 57-60.
11. Гафиятуллин, А.А. Обеспечение работоспособности шатунных подшипников автотракторных двигателей путём создания неразрывности масляного потока: дис. ... канд.техн.наук / А.А. Гафиятуллин. – Саратов. – 2005. – 119 с.
12. Родичев, А.Ю. Система мониторинга состояния узлов и агрегатов промышленного оборудования / А.Ю. Родичев, А.В. Горин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №6(362) – 2023. С.101 – 108.
13. Шутин, Д.В. Управление сервоклапанами для реализации активной смазки гидростатодинамических подшипников / Д.В. Шутин, К.К. Настепанин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №3(359) – 2023. С.137 – 144.
14. Шутин, Д.В. Анализ точности показаний датчиков перемещений при определении положения ротора в опорах жидкостного трения / Д.В. Шутин, А.С. Фетисов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №3(353) – 2022. С.103 – 110.
15. Воскресенский, В. А. Расчёт и проектирование опор скольжения (жидкостная смазка): Справочник / В. А. Воскресенский, В.И. Дьяков. – М.: Машиностроение, 1980. – 224 с.
16. Сытин, А.В. Расчет характеристик упорного лепесткового газодинамического подшипника совместным решением задач газодинамики и теории упругости / А.В. Сытин, С.А. Власова, А.Д. Серебренников, К.В. Смирнова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №5(361) – 2023. С.72 – 80.
17. Сытин, А.В. Расчет характеристик радиального лепесткового газодинамического подшипника с изменяемой геометрией опорной поверхности / А.В. Сытин, С.А. Власова, И.А. Серенко, А.Д. Серебренников // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №6(362) – 2023. С.108 – 116.
18. Крагельский, И.В. Основы расчётов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
19. Крагельский, И.В. Коэффициенты трения. Справочное пособие / И.В. Крагельский, И.Э. Виноградова. – М.: Машгиз, 1962 г. – 222 с.
20. 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 - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №6(350) – 2021. С.71 – 77.
21. Майоров, С.В. Исследование динамики ассиметричного ротора в активных комбинированных опорах / С.В. Майоров, М.Э. Бондаренко, М.А. Токмакова, В.А. Позднякова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева – № 3 (353) -2022 – С. 73-82.
22. Бондаренко, М.Э. Комбинированный подшипниковый узел с изменяемыми жёсткостными и демпфирующими характеристиками / М.Э. Бондаренко, Р.Н. Поляков, А.В. Горин, В.А. Позднякова //

**Бондаренко Максим Эдуардович**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел  
Доцент кафедры мехатроники, механики и  
робототехники  
302030, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
E-mail: maxbondarenko22@yandex.ru

**Родичев Алексей Юрьевич**

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

**Смирнова Кристина Владимировна**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл  
Студент кафедры мехатроники, механики и  
робототехники  
302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29  
E-mail: kristinka\_boom@mail.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: rodfox@yandex.ru

**Васильев Кирилл Владимирович**

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

M.E. BONDARENKO, A.Yu. RODICHEV, K.V. SMIRNOVA, I.V. RODICHEVA, K.V. VASILYEV

## INFLUENCE OF SOLID ANTI-FRICTION COATINGS ON THE FRICTION COEFFICIENT IN THE SLIDING BEARINGS

**Abstract.** *The article presents a brief analysis of the conditions and operating modes of plain bearings. A description of the Gherzi-Stribeck curve is given in relation to the rotor run-out in sliding supports. The dependence of the maximum friction coefficient is derived from the results of experimental studies. Graphs of the dependence of the friction coefficient on time are shown and described for the bearing surface treated with Molykote antifriction coating and the sliding bearing surface made of BrOF10 bronze. Conclusions are drawn and recommendations are given for the use of Molykote solid anti-friction coating.*

**Keywords:** *rotor, fluid film bearing, antifriction coating, friction coefficient.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Drozdov Yu.N., Yudin E.G., Belov A.I. Applied tribology (friction, wear, lubrication) / Ed. Yu.N. Drozdova. – M.: “Eco-Press”, 2010. – 604 p.
2. Zakharov, S.M., Buyanovsky I.A. Lubrication // In the book. Friction, wear and lubrication (tribology and tribology) / A.V. Chichinadze, E.M. Berliner, E.D. Brown et al.; Under general ed. A.V. Chichinadze. – M.: Mechanical Engineering, 2003. – p. 184-248.
3. Buyanovsky, I.A. Boundary lubrication // In the book. “Modern tribology: results and prospects” / Ed. K.V. Frolova. – M.: Publishing house LKI. – 2008, 226-278.
4. Rodichev, A.Yu. Study of the possibility of using artificial neural networks for the diagnosis of rotor-support units / A.Yu. Rodichev, R.N. Polyakov, K.V. Vasiliev, E.M. Minaeva // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 6 (356) – 2022. P. 91 – 96.
5. Gorin, A.V. Analysis of control methods and classifications for diagnosing anomalous conditions / A.V. Gorin, R.K. Zaretsky, A.K. Pozdnyakov // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 3(353) – 2022. P.59 – 67.
6. Venzel S.V., Lelyuk V.A. Results of the study of running-in friction pairs. – In the collection: Theory of lubrication action and new materials, M.: Nauka, 1965, p. 81-85.
7. Bondarenko, M.E. Analysis of experimental studies of active combined rotor support / M.E. Bondarenko, R.N. Polyakov, M.A. Tokmakova, A.D. Serebrennikov // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 1 (357) – 2023. P. 133 – 140.
8. Fetisov, A.S. Experimental analysis of the accuracy of determining the rotor position in fluid friction supports / A.S. Fetisov, D.V. Shutin, M.N. Smetanin, K.K. Nastepanin // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 6 (356) – 2022. P. 83 – 91.
9. Rodichev, A.Yu. Experimental unit of labyrinth seals in mechatronic mechanisms / A.Yu. Rodichev, A.V. Vnukov, I.V. Rodicheva, K.V. Vasiliev // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 5 (361) – 2023. P. 59 – 65.
10. Denisov, A.S. The influence of lubrication conditions on the thickness of the oil layer in connecting rod bearings of a diesel engine / A.S. Denisov, I.K. Danilov // Bulletin of SSTU. – 2005. – No. 4 (9). – P. 57-60.
11. Gafiyatullin, A.A. Ensuring the performance of connecting rod bearings of automobile and tractor engines by creating continuity of oil flow: dis.... candidate of technical sciences / A.A. Gafiyatullin. - Saratov. – 2005. – 119 p.

12. Rodichev, A.Yu. System for monitoring the condition of components and assemblies of industrial equipment / A.Yu. Rodichev, A.V. Gorin // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 6 (362) – 2023. P. 101 – 108.
13. Shutin, D.V. Control of servo valves for the implementation of active lubrication of hydrodynamic bearings / D.V. Shutin, K.K. Nastepanin // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 3 (359) – 2023. P. 137 – 144.
14. Shutin, D.V. Analysis of the accuracy of displacement sensor readings when determining the position of the rotor in fluid friction supports / D.V. Shutin, A.S. Fetisov // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 3 (353) – 2022. P. 103 – 110.
15. Voskresensky, V.I. Calculation and design of sliding supports (liquid lubrication): Handbook / V.A. Voskresensky, V.I. Dyakov. – M.: Mechanical Engineering, 1980. – 224 p.
16. Sytin, A.V. Calculation of characteristics of a thrust petal gas-dynamic bearing by joint solution of problems of gas dynamics and elasticity theory / A.V. Sytin, S.A. Vlasova, A.D. Serebrennikov, K.V. Smirnova // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 5 (361) – 2023. P. 72 – 80.
17. Sytin, A.V. Calculation of characteristics of a radial petal gas-dynamic bearing with variable geometry of the supporting surface / A.V. Sytin, S.A. Vlasova, I.A. Serenko, A.D. Serebrennikov // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 6 (362) – 2023. P. 108 – 116.
18. Kragelsky, I.V. Fundamentals of calculations for friction and wear / I.V. Kragelsky, M.N. Dobychin, V.S. Kombarov. – M.: Mashinostroyeniye, 1977. – 526 p.
19. Kragelsky, I.V. Friction coefficients. Reference manual / I.V., Kragelsky, I.E. Vinogradova. – M.: Mashgiz, 1962 – 222 p.
20. 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.
21. Mayorov, S.V. Study of the dynamics of an asymmetric rotor in active combined supports / S.V. Mayorov, M.E. Bondarenko, M.A. Tokmakova, V.A. Pozdnyakova // Fundamental and applied problems of engineering and technology. – Orel: OSU named after I.S. Turgenev – No. 3 (353) 2022 – P. 73-82.
22. Bondarenko, M.E. Combined bearing unit with variable rigidity and damping characteristics / M.E. Bondarenko, R.N. Polyakov, A.V. Gorin, V.A. Pozdnyakova // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 5 (355) – 2022. P. 51 – 58.

**Bondarenko Maxim Eduardovich**

Orel State University,  
Associate Professor of the Department Mechatronics,  
Mechanics and Robotics  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: maxbondarenko22@yandex.ru

**Rodichev Alexey Yuryevich**

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

**Smirnova Kristina Vladimirovna**

Orel State University  
Student of the Department Mechatronics, Mechanics and  
Robotics  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: kristinka\_boom@mail.ru

**Rodicheva Irina Vladimirovna**

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

**Vasilyev Kirill Vladimirovich**

Orel State University,  
Student of the Department Mechatronics, Mechanics and  
Robotics  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: maxbondarenko22@yandex.ru

© М.Э. Бондаренко, А.Ю. Родичев, К.В. Смирнова, И.В. Родичева, К.В. Васильев, 2024



# **ПРИБОРЫ, БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ**

УДК 004.942

DOI: 10.33979/2073-7408-2024-364-2-124-129

А.В. ПУШКАРЕВА

## **СЖАТИЕ БИМЕДИЦИНСКИХ СИГНАЛОВ В ТЕЛЕМЕДИЦИНСКИХ СИСТЕМАХ**

**Аннотация.** Активный рост телемедицинских и систем персонализированного мониторинга состояния здоровья обуславливает необходимость обработки и передачи огромного количества биомедицинских данных. Развитие интернет-технологий диктует высокие требования быстрой передачи и сохранения содержания клинической информации. Для решений этой задачи целесообразным является разработка алгоритмов обработки биомедицинских данных и их последующая программная реализация в программно-аппаратных телемедицинских комплексах для диагностики и лечения. Автором предложено рассмотреть модифицированный алгоритм Прони с предварительным применением процедуры экстремальной фильтрации, использование которого эффективно для зашумленных сигналов и обеспечивает высокую точность восстановления исходной информации, минимизируя высокую трудоемкость классического метода. В статье представлены результаты математического моделирования модифицированного алгоритма, позволяющие сделать вывод о перспективах его применения для обработки и сжатия в телемедицинских системах.

**Ключевые слова:** сжатие сигналов, телемедицина, телемедицинские системы, биомедицинские сигналы, метод Прони, погрешность восстановления, среднеквадратическое отклонение.

### **Введение**

В настоящее время активными темпами идет цифровая трансформация системы здравоохранения, в которой телемедицинские технологии имеют значительный потенциал для решения задач обеспечения населения доступными, персонализированными и высококачественными медицинскими услугами.

В связи с активной интеграцией телемедицинских систем (ТМС), обусловленной в том числе вспышкой новой коронавирусной инфекции, требования к ним становятся все более высокими.

Основными требованиями, предъявляемыми к программному обеспечению ТМС, являются низкая погрешность восстановления исходной клинической информации и высокая скорость передачи биомедицинских данных. Помимо этого, характерной чертой современных телемедицинских комплексов является многоканальность, обусловленная необходимостью одновременной передачи большого числа разнородных измеряемых величин[1].

### **Материалы и методы**

Разработка программно-алгоритмического обеспечения ТМС на первом этапе определяется выбранным методом аппроксимации. Предложено рассмотреть модель на основе рациональной передаточной функции, позволяющей описать многие детерминированные и случайные биологические процессы [2]. Линейное разностное уравнение, несущее информацию о сигнале, как и дифференциальное уравнение для аналоговых сигналов связывает в этой модели входной набор данных  $x_i$  и выходной набор данных  $y_i$ , необходимые для проведения математического моделирования биомедицинского сигнала. Исходный сигнал может быть наилучшим образом описан с использованием авторегрессионного уравнения со скользящим средним, которое представляет собой линейное разностное уравнение следующего вида:

$$y_i = \sum_{l=0}^q b_l x_{i-l} - \sum_{k=1}^p a_k y_{i-k}, \quad (1)$$

где  $\{x_{i-l}\}$  и  $\{y_{i-k}\}$   $i = 1, 2, \dots, N$  – дискретные последовательности входного воздействия и отклика на него соответственно;  $a_k$ ,  $k=1, 2, \dots, p$  и  $b_l$ ,  $l=1, 2, \dots, q$  – оцениваемые параметры модели.

Для определения параметров исходных сигналов необходимо произвести оценку параметров авторегрессионной модели. Метод наименьших квадратов Прони, модель которого позволяет описать сигналы любой природы, комбинируя колебательные

составляющие, постоянную составляющую, экспоненту, и др. является одним из методов оценки параметров:

$$y_i = \sum_{j=0}^p U j e^{\alpha_j |\Delta t|} e^{j(2\pi f_j \Delta t + \varphi_i)} = \sum_{j=0}^p U_j e^{j\varphi_i} \cdot e^{(\alpha_i \pm j2\pi f_i) \Delta t} = - \sum_{j=1}^p h_j z_j^i \quad (2)$$

где  $U$  – амплитуда,  
 $\alpha$  – фаза,  
 $f$  – частота,  
 $\phi$  – затухание.

В методе Прони [3] определяются параметры сигнала, минимизирующие среднеквадратическое отклонение:

$$\sigma^2 = \sum_{i=0}^{N-1} |y_i - \bar{y}_i|^2 \quad (3)$$

где  $y$  – исходная функция  
 $\bar{y}_i$  – аппроксимирующая кривая.

Алгоритм обработки временного ряда биомедицинских сигналов на основе метода Прони включает в себя:

- 1) Выбора шага дискретизации и запись дискретных отсчетов сигнала  $\Delta t$ ;
- 2) Выбор порядка для модели аппроксимации:

$$y_n = - \sum_{m=1}^p a_m y_{n-m} \quad (4)$$

- 3) Генерация матрицы  $A_1$  и вектора-столбца свободных членов  $A_2$  системы уравнений.
- 4) Нахождение решения системы уравнений  $A = A_1/A_2$
- 5) Генерация коэффициентов  $a_j$ ,  $j=0 \dots$  характеристического уравнения:

$$z^p + a_1 z^{p-1} + \dots + a_p = 0 \quad (5)$$

- 6) Вычисление корней  $z_j$  характеристического уравнения (5)

$$z_{i,i+1} = e^{(\alpha_i \pm j2\pi f_i) \Delta t} \quad (6)$$

- 7) Вычисление частот  $f_i$  и затуханий  $\alpha_i$ :

$$\alpha_i = \frac{\ln |z_i|}{\Delta t}, f_i = \arctg \left[ \frac{\operatorname{Im} z_i}{\operatorname{Re} z_i} \cdot \frac{1}{2\pi \Delta t} \right] \quad (7)$$

- 8) Генерация матрицы  $h_1$  и вектора-столбца свободных членов  $h_2$  системы (2)

- 9) Вычисление комплексных амплитуд

$$h = h_1/h_2: \frac{d\sigma^2}{db_i} = 2 \sum_{i=p}^{N-1} |y_i \cdot z_i^1 \cdot z_i^i + \dots + h_i \cdot z_i^i \cdot z_i^i \dots + h_p \cdot z_p^i \cdot z_i^i| = 0 \quad (8)$$

- 10) Вычисление амплитуд  $U_i$  и фаз  $\varphi_i$ :

$$A_i = |h_i|, \varphi_i = \arctg \frac{\operatorname{Im}(h_i)}{\operatorname{Re}(h_i)} \quad (9)$$

- 11) Передача вычисленных значений  $f_i, \alpha_i, \varphi_i, U_i$

Моделирование метода с целью определения возможностей применимости его для передачи биомедицинских данных в ТМС, реализовано на основе дискретной математической модели:

$$u_i = \sum_{m=1}^p U_m \cdot \cos(2\pi i \Delta t f_m + \varphi_m) + \varepsilon_i \quad (10)$$

где  $U_m, f_m, \varphi_m$  – амплитуда, частота и фаза  $m$ -той гармоники сигнала, соответственно;  
 $i$  – номер отсчета сигнала (дискретное время);  $\varepsilon_i$  – значения аддитивного белого шума;  
 $N$  – количество дискретных отсчетов биомедицинского сигнала;  
 $\Delta t$  – шаг дискретизации [4,5].

Моделирование алгоритма было реализовано в среде *MatLab*, анализ влияния различных факторов также был проведен в этой среде на основе алгоритма, представленного на рисунке 1.[6]. Математическое моделирование корреляции погрешности измерения параметров биомедицинского сигнала и погрешности восстановления от различных влияющих факторов проводилось последовательно для исключения влияния других факторов. Погрешность восстановления сигнала вычислена путем определения среднеквадратического отклонения набора данных исходного сигнала  $y$  от сигнала аппроксимации  $\bar{y}_1$ , отнесенное к максимальному значению сигнала:

$$\sigma_{восст} = \frac{\sqrt{\sum_i (y_i - \bar{y}_i)^2 / N}}{y_{\max}} \cdot 100\% \quad (11)$$

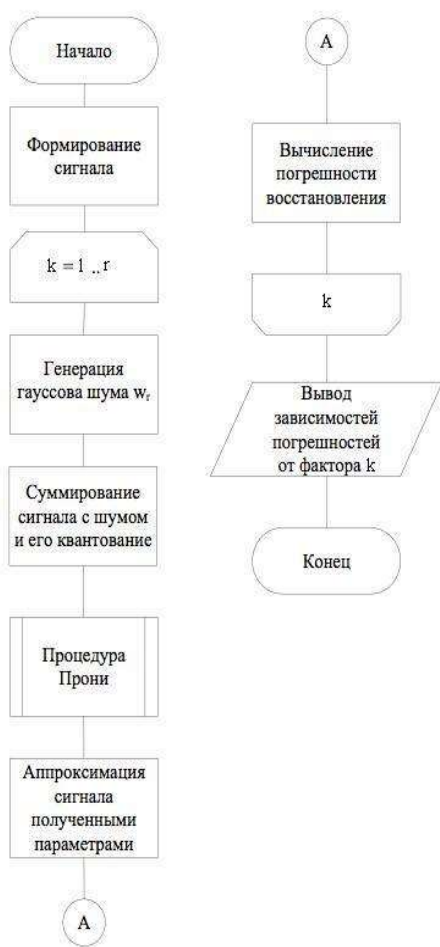


Рисунок 1 – Алгоритм анализа влияния выбранного фактора  $k$  на погрешность восстановления сигнала

### Результаты.

Установлено, что значение погрешности при исследовании влияния порядка аппроксимирующей модели может сохраняться на уровне 0,005% при генерации порядка модели выше восьмого. Наименьшие значения погрешности восстановления биомедицинского сигнала могут быть достигнуты путем обработки сигнала десятым порядком модели [7]. Выбор завышенного порядка аппроксимирующей модели по сравнению с фактическим при определении параметров биомедицинского сигнала и его восстановления в присутствии шумов характеризуется снижением погрешности. [8,9,10].

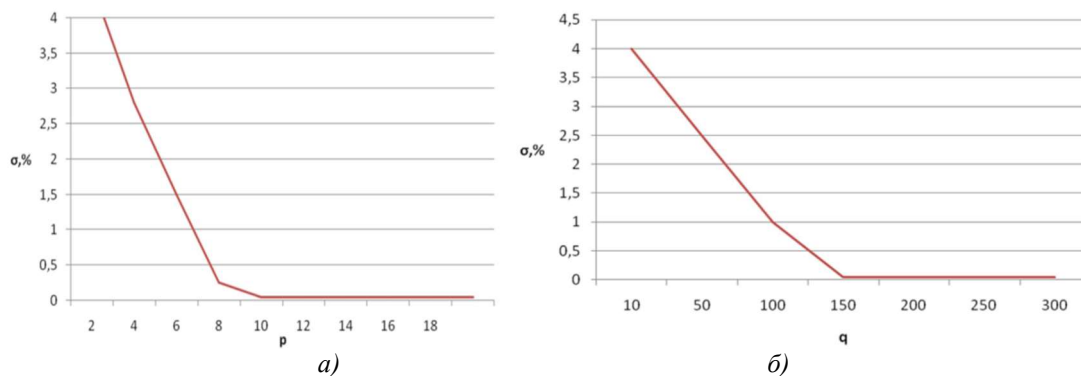


Рисунок 2 – График корреляции между погрешностью восстановления биомедицинского сигнала и а) порядком модели б) отношением сигнал/шум

Исследования в среде MatLab показали, что реализация метода Прони характеризуется высокими временными затратами и трудоемкостью, что позволяет сделать вывод о трудности интеграции метода в состав программного обеспечения мониторинговых ТМС, поэтому целесообразной является задача модификации классического метода Прони путем комбинаций с другими методами.

В качестве модификации классического метода Прони автором рассмотрено предварительное разложение исследуемого биомедицинского сигнала на знакопеременные составляющие на основе известного метода экстремальной фильтрации.

Модифицированный алгоритм обработки биомедицинского сигнала на основе классического метода Прони включает:

1. Выделение из сигнала максимумов функции в некоторой области, т.е. экстремумов.
2. Измерение интервалов времени между значениями экстремумов.
3. Исключение высокочастотной составляющей:

$$y_{zi} = 0,25y_{zi-1} + 0,5y_{zi} + 0,25y_{zi+1} \quad (12)$$

4. Определение разности между измеряемым сигналом и уже выделенными составляющими (сглаженная последовательность) [11]:

$$\bar{y}_{zi} = -0,25y_{zi-1} + 0,5y_{zi} - 0,25y_{zi+1} \quad (13)$$

5. Применение классического метода Прони к сглаженной последовательности.
6. Выполнение последовательности действий по пунктам 1-5 до момента, когда итоговая последовательность экстремумов будет знакопеременной.

Сокращение объема параметров передаваемых биомедицинских сигналов на основе модифицированного метода с предварительной фильтрацией возможно реализовать, изначально передавая по каналам связи не последовательность дискретных отсчетов, только максимумы сигнала, изначально сокращая количество обрабатываемых данных.

Для оценки модифицированного метода в задачах сжатия биомедицинских сигналов необходимо проанализировать его функциональные возможности и метрологические характеристики.

Анализ характеристик классического и модифицированного метода Прони при решении задачи обработки, сжатия и последующего восстановления биомедицинских сигналов реализована на основе математического моделирования в среде MatLab при исследовании 1000 дискретных отсчетов.

Рассчитано время, затрачиваемое на обработку сигналов, определен коэффициент сжатия  $k$  и вычислена погрешность восстановления биомедицинских сигналов согласно предложенному модифицированному методу (рисунки 3,4).

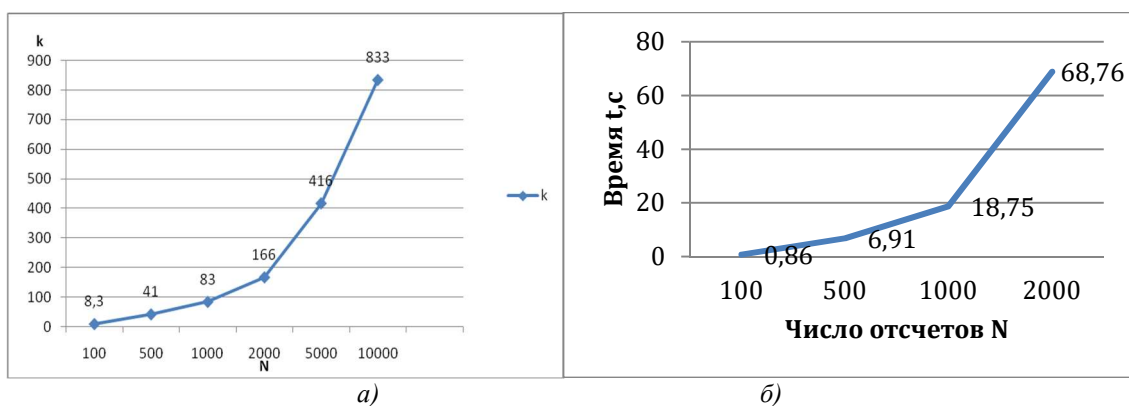


Рисунок 3– Корреляция между а) коэффициентом сжатия, б) временем обработки сигнала и числом дискретных отсчетов при использовании комбинации МНК Прони и метода экстремальной фильтрации от числа отсчетов N

### Заключение

Исследования, проведенные в среде Matlab, позволяют выработать рекомендации по применению модифицированного метода Прони с предварительным применением алгоритма экстремальной фильтрации в задачах сжатия и передачи биомедицинских сигналов в современных ТМС. Определены параметры обработки, которые позволяют достигать высокую точность восстановления клинической информации с погрешностью не более 1%:

1. Число отсчетов, минимально необходимое для достижения уровня погрешности восстановления на уровне 1% при использовании модифицированного метода Прони соответствует 900. Последующее увеличение количества отсчетов нецелесообразно – погрешность остается стабильной на уровне 1%.

2. Длительность исходного биомедицинского сигнала должна составлять не менее 1 мин.

3. Применение модифицированного метода Прони обеспечивает восстановление биомедицинского сигнала с погрешностью на уровне 1% при отношении сигнал шум более 150.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Егорова Е.В. Методы и алгоритмы вейвлетной обработки сигналов в цифровых системах связи: автореферат дис...канд.техн.наук: 05.12.04. – Москва, 2010. –186с.
2. Марпл.-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 584с.
3. Мясникова М.Г.Измерение параметров электрических сигналов на основе метода Прони: Дис... канд. техн. наук:05.11.01. – Пенза, 2007. – 181 с.
4. Бушуев О.Ю. Применение метода Прони для анализа выходных сигналов преобразователей давления/Бушуев О.Ю.//Вестник Южно-уральского государственного университета, 2012. – Вып. 23
5. Лучин Д.В. Устройства обработки и визуализации сигналов вихретоковых преобразователей для компьютерной дефектоскопии изделий: Дис...канд.техн.наук: 05.13.05.–Самара,1999.
6. Мясникова, М.Г. Оценивание погрешности метода Прони в измерительных задачах / М.Г. Мясникова, Е.О. Самсонкина, М.О. Самсонкина // Современные проблемы оптимизации в инженерных приложениях: сб. тр. Первой Междунар. науч.-техн. конф. – Ярославль, 2005.
7. Мясникова, М.Г. Методы определения порядка авторегрессионной модели / М.Г. Мясникова, В.В. Козлов // Современные проблемы оптимизации в инженерных приложениях: сб. тр. Первой Междунар. науч.-техн. конф. – Ярославль, 2005.
8. Пушкарева А.В. Методика обработки, сжатия и восстановления данных/А.В. Пушкарева, М.Г. Мясникова, Б.В.Цыпин, А.С. Ластурина// Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль.– Пенза: Изд-во Пенз.гос.ун-та, 2012. – №1. – С.20-25.
9. Мясникова Нина Владимировна, Боряк Сергей Васильевич, Мясникова Мария Геннадьевна Обработка сигналов в системах ультразвуковой локации объектов для закрытых помещений // Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки. 2019. №4 (52).
10. Ingeborg Keller and Gerlind Plonka, "Modifications of Prony's method for the recovery and sparse approximation of generalized exponential sums" in Mathematics & Statistics, Cham:Springer, vol. 336, 2021.
11. Мясникова Н. В.Спектральный анализ сигналов по амплитудным и временным параметрам на основе измерительного эксперимента: Дис...док. техн. наук: 05.11.01. –Пенза,2001. –379с.

**Пушкарева Анастасия Валерьевна**

ФГБОУ ВО «ПензГТУ», г. Пенза

кандидат технических наук, доцент каф. “Биомедицинская инженерия”

440039 пр-д Байдукова, 1А, Пенза

Тел: 8-905-016-07-39

E-mail:a.v.push89@gmail.com

---

A.V. PUSHKAREVA

## COMPRESSION OF BIOMEDICAL SIGNALS IN TELEMEDICAL SYSTEMS

**Abstract.** *The rapid growth of telemedicine and systemic personalized health surveillance is driving the expected processing and transmission of quantitative biomedical data. The transmission of large amounts of data over*

*communication channels requires high bandwidth. The development of Internet technologies dictates high requirements for the rapid transfer of biomedical data. An effective way to solve the problem is to develop algorithms for reproducing and restoring signals and upgrading the software.*

*It is proposed to consider the Prony method, the application of which makes it possible to measure the parameters of oscillatory components with high accuracy against the background of noise and interference. It is of interest to consider the possibilities of applying the method for compression-recovery of measuring signals in information-measuring systems and to evaluate the results obtained.*

**Keywords:** *signal compression, telemedicine, telemedicine systems, biomedical signals, Prony method, reconstruction error, standard deviation.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Egorova E.V. Methods and algorithms of wavelet processing of signals in digital communication systems: abstract of thesis.... candidate of technical sciences: 05.12.04. - Moscow, 2010. -186s.
2. Marple Jr. S. L. Digital spectral analysis and its applications: Per. from English. - M.: Mir, 1990. - 584 p.
3. Myasnikova M.G. Measurement of the parameters of electrical signals based on the Prony method: Dis... cand. tech. Sciences: 05.11.01. - Penza, 2007. - 181 p.
4. Bushuev O.Yu. Application of the Prony method for analyzing the output signals of pressure transducers / Bushuev O.Yu.//Bulletin of the South Ural State University, 2012. - Issue. 23
5. Luchin D.V. Devices for processing and visualization of signals from eddy current transducers for computer flaw detection of products: Dis... candidate of technical sciences: 05.13.05. - Samara, 1999.
6. Myasnikova, M.G. Estimation of the error of the Proni method in measuring tasks / M.G. Myasnikova, E.O. Samsonkina, M.O. Samsonkina // Modern problems of optimization in engineering applications: Sat. tr. First International sci.-tech. conf. - Yaroslavl, 2005.
7. Myasnikova, M.G. Methods for determining the order of an autoregressive model / M.G. Myasnikova, V.V. Kozlov // Modern problems of optimization in engineering applications: Sat. tr. First International sci.-tech. conf. - Yaroslavl, 2005.
8. Pushkareva A.V. Technique of processing, compression and data recovery / A.V. Pushkareva, M.G. Myasnikova, B.V. Tsypin, A.S. Lasturina // Measurement. Monitoring. Control. Control. - Penza: Publishing House of the Penz State University, 2012. - No. 1. - P.20-25.
9. Myasnikova Nina Vladimirovna, Boryak Sergey Vasilievich, Myasnikova Maria Gennadiyevna Signal processing in ultrasonic location systems for objects for enclosed spaces // News of universities. Volga region. Technical science. 2019. No. 4 (52).
10. Ingeborg Keller and Gerlind Plonka, "Modifications of Prony's method for the recovery and sparse approximation of generalized exponential sums" in Mathematics & Statistics, Cham:Springer, vol. 336, 2021.
11. Myasnikova N.V. Spectral analysis of signals based on amplitude and time parameters based on a measurement experiment: Dis...doc. tech. Sciences:05.11.01. –Penza, 2001. –379s.

### Pushkareva Anastasia Valerevna

Penza state technological university, Penza

candidate of technical sciences, associate professor "Biomedical engineering" department

440039 pr-d Baidukova, 1A, Penza

Phone: 8-905-016-07-39

© А.В. Пушкарева, 2024

А.В. ДОЛОГЛОНЯН, В.Т. МАТВЕЕНКО, А.Г. КЛИМЕНКО

## ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛНЕЧНЫХ ГИБРИДНЫХ МИКРОГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК НА ЧАСТИЧНЫХ НАГРУЗКАХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ НАГРУЖЕНИЯ

**Аннотация.** Работа солнечных гибридных энергетических установок часто осуществляется на частичных нагрузках в зависимости от условий эксплуатации. Поэтому необходимо оценить их характеристики и эффективность на переменных режимах работы. Предметом рассмотрения в статье является исследование влияния схем газотурбинных двигателей на эффективность солнечных гибридных микрогазотурбинных установок при работе на частичных нагрузках при винтовом и генераторном режимах работы. Установлено, что при больших площадях апертуры фокусирующего солнечного коллектора (ФСК) и работе на частичных нагрузках в летнее время имеет место превышение температуры воздуха на выходе из ФСК над максимальной температурой цикла. Это вызывает необходимость либо ограничивать площадь апертуры ФСК для двигателей с малым давлением воздуха (0,4...0,6 МПа) после компрессора, либо устанавливать дополнительный охладитель воздуха для двигателей с большим давлением воздуха (более 1 МПа) после компрессора. Показано, что при снижении нагрузки солнечной гибридной микрогазотурбинной установки, в отличие от обычной, в солнечное время приводит к росту ее эффективности для любой схемы при площадях апертуры ФСК больше пороговых. Определено, что чем больше величина относительной нагрузки, при которой наступает равенство нулю относительного расхода топлива, тем эффективней работа установки на частичных нагрузках в солнечное время при дальнейшем снижении нагрузки. Определено, что при винтовом способе нагружения показатели эффективности солнечных гибридных микрогазотурбинных установок выше, чем при генераторном.

**Ключевые слова:** микрогазотурбинная установка, микротурбина, регенерация теплоты, фокусирующий солнечный коллектор, турбокомпрессорный утилизатор, частичные нагрузки.

### Введение

Солнечные гибридные микрогазотурбинные установки (МГТУ) по сравнению с установками на возобновляемых источниках энергии (ВИЭ) имеют следующие преимущества:

1. Могут обеспечить устойчивое и постоянное снабжение объекта энергией требуемого качества в необходимом количестве.
2. Не требуется аккумуляирования энергии, вырабатываемой ВИЭ.
3. Комбинированная выработка тепловой и электрической энергии.
4. Возможность гибкого регулирования рабочего процесса микрогазотурбинных двигателей (МГТД) за счет перераспределения потоков энергии внутри цикла (с помощью регулируемого соплового аппарата или байпасирования циклового воздуха мимо регенератора при его наличии) для изменения соотношения выходной тепловой и электрической энергии в зависимости от потребностей локального объекта (потребителя).
5. Повышение экономичности базовой установки за счет использования ВИЭ.
6. Более низкая удельная стоимость по сравнению с ВИЭ.

В работах [1, 2] установлено, что включение фокусирующего солнечного коллектора (ФСК) в состав МГТД обеспечивает повышение среднегодового коэффициента использования топлива на 10...12 % в зависимости от климатических условий (от умеренных до тропических).

Поскольку работа солнечных гибридных энергетических установок часто осуществляется на частичных нагрузках в зависимости от условий эксплуатации, то необходимо определить их энергоэффективность на частичных нагрузках. В настоящей работе будут рассмотрены винтовой и генераторный режимы работы солнечных гибридных МГТУ на частичных нагрузках, а также произведена сравнительная оценка показателей эффективности.

### Базовые схемы ГТД, работающих на органическом топливе

МГТД могут находить применение для энергообеспечения локальных объектов, как стационарных, технологических, так и транспортных подводных и надводных объектов. За основу базовой схемы МГТД принят газотурбинный двигатель (ГТД) простого цикла (см.

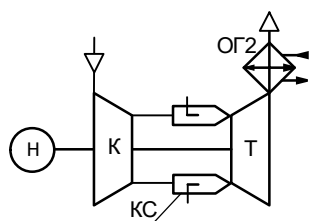


рисунок 1), который можно усложнить с целью увеличения КПД. При этом ГТД простого цикла является одновальным с заблокированной турбиной для привода электрогенератора.

Усложнение ГТД простого цикла (ПЦ) предлагается осуществлять за счет:

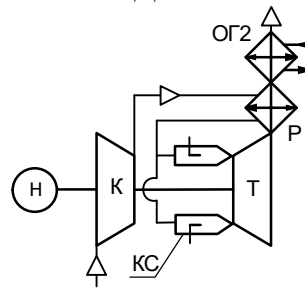
- регенерации теплоты выхлопных газов в рабочем цикле двигателя;
- применения турбины перерасширения рабочего тела за силовой турбиной [2-5] с целью повышения мощности ГТД;
- применение комбинации предыдущих методов.

На рисунке 2 изображена схема газотурбинной установки ПЦ с регенерацией (Р) теплоты (ПЦ+Р), в которой по отношению к схеме ГТУ простого цикла добавлен теплообменник-регенератор для подогрева рабочего тела перед камерой сгорания за счет теплоты выхлопных газов двигателя, который позволит повысить КПД самого двигателя.



**Рисунок 1 – Схема когенерационной МГТУ ПЦ:**

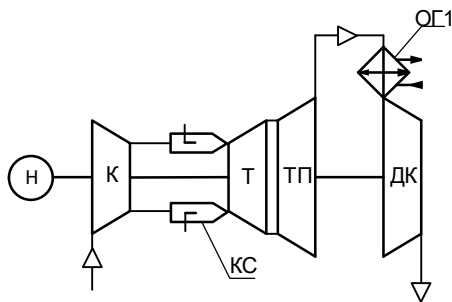
*К – компрессор; КС – камера сгорания; Т – турбина; ОГ2 – охладитель газов; Н – нагрузка*



**Рисунок 2 – Схема когенерационной МГТУ ПЦ+Р:**

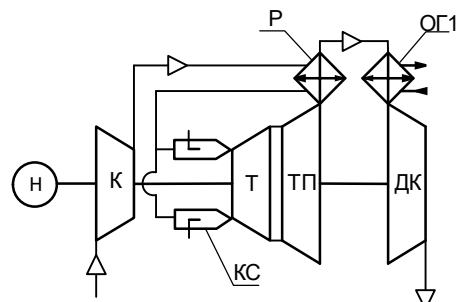
*Р – регенератор; остальные обозначения, как на рисунке 1*

На рисунке 3 изображена схема МГТУ с турбокомпрессорным утилизатором (ТКУ). Турбина перерасширения (ТП), приводящая дожимающий компрессор (ДК) с охладителем газа (ОГ1) между ними, который выполняет роль котла-утилизатора, образует турбокомпрессорный утилизатор. Посредством применения в рабочем цикле перерасширения рабочих газов за силовой турбиной увеличивается мощность двигателя при том же расходе топлива и, следовательно, повышается КПД двигателя.



**Рисунок 3 – Схема когенерационной МГТУ ПЦ+ТКУ:**

*ТП – турбина; ОГ1 – охладитель газов; ДК – дожимающий компрессор; остальные обозначения, как на рисунке 1*



**Рисунок 4 – Схема когенерационной МГТУ ПЦ+ТКУ+Р:**

*обозначения такие же, что и на рисунке 1-3*

Повышение КПД МГТД возможно также за счет глубокой утилизации теплоты выхлопных газов двигателя, превратив 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 встроить между турбиной перерасширения и дожимающим компрессором. На рисунке 4 изображена схема МГТД с ТКУ и регенерацией теплоты. Охладитель газа ОГ1 обеспечивает понижение температуры газа перед ДК с целью снижения в нем работы сжатия. Охладитель ОГ1, как и предыдущей схеме, может выполнять функции котла-утилизатора для обеспечения локального объекта теплотой.

### Методика и результаты исследования характеристик усложненных ГТД на номинальном режиме

Исследование характеристик рабочих циклов МГТД при работе на номинальном режиме производилось с использованием физико-математических моделей и программного обеспечения, ранее опробованного при анализе параметров в ГТУ, приведенных в работе [3].

В настоящее время в микрогазотурбинной технике достигнуты значительные успехи в области повышения эффективности ее элементов [4, 5]. В микрогазотурбинных установках необходимо учитывать конструктивные факторы, влияющие на аэродинамические характеристики компрессоров и турбин [4-7]. Так КПД компрессора находится в пределах 82...86 %, охлаждаемой турбинной ступени  $\eta_t = 84...86$  %, неохлаждаемой турбины достигает 88...90 % при степени повышения давления в компрессоре  $\pi_k = 2...6$ . Начальная температура газа  $T_3$  в микротурбине имеет значение от 1173 до 1373 К, 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 микротурбинных установок. 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 теплообмениваемых сторон [8].

Для моделирования установок, изображенных на рисунках 1-4, были приняты исходные данные, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры МГТУ

Наименование параметра	Ед. измерения	Численное значение
Адиабатный КПД турбины	—	0,88
Адиабатный КПД компрессора	—	0,8
Адиабатный КПД турбины перерасширения <sup>1</sup>	—	0,9
Адиабатный КПД дожимающего компрессора <sup>2</sup>	—	0,88
КПД камеры сгорания	—	0,97
КПД электрогенератора	—	0,96
Плотность матрицы регенератора	м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>	164
Коэффициент восстановления давления в регенеративном теплообменнике со стороны газа для ПЦ+Р <sup>3</sup>	—	$\varepsilon_z = \left(1 + c_z \frac{r}{1-r}\right)^{-1}$
Коэффициент восстановления давления в регенеративном теплообменнике со стороны газа для ПЦ+ТКУ+Р <sup>3</sup>	—	$\varepsilon_z = \frac{1}{2c_z \varepsilon_{oz1}^2 \pi_{ок}^2} \frac{1-r}{r} \left( \sqrt{1 + 4c_z \varepsilon_{oz1}^2 \pi_{ок}^2 \frac{r}{1-r}} - 1 \right)$
Коэффициент восстановления давления в регенеративном теплообменнике со стороны воздуха <sup>3</sup>	—	$\varepsilon_g = 1 - c_g \frac{r}{1-r}$
Коэффициент восстановления давления на входе в установку, $\varepsilon_{gx}$	—	0,97
Коэффициент восстановления давления в КС, $\varepsilon_{кс}$	—	0,97
Коэффициент восстановления давления на выходе из установки, $\varepsilon_{вых}$	—	0,97
Коэффициент восстановления давления на выходе из установки, $\varepsilon_{oz1}, \varepsilon_{oz2}$	—	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 $c_z$ и $c_g$ определялись из параметров существующих прототипов [8].		

Параметры циклов МГТД, работающих по схемам, приведенным на рисунках 1-4 и

исходных данных, отображенных в таблице 1, и максимальной температуре цикла  $T_3 = 1373$  К представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры МГТД на номинальном режиме

Наименование параметра	Ед. изм.	ПЦ	ПЦ+Р	ПЦ+ТКУ	ПЦ+ТКУ+Р
Эффективный КПД МГТУ	%	29,2	35,4	35,6	37,4
Температура газов на выходе из турбины	К	759	961	610	865
Температура газов на входе в парогенератор	К	759	597	610	580
Оптимальная степень повышения давления в компрессоре	–	21	6,4	14,4	5,3
Оптимальная степень повышения давления в ДК	–	–	–	3,5	1,8
Оптимальная степень регенерации	–	–	0,875	–	0,83
Удельная мощность на валу силовой турбины	кВт/кг	219	187	308	244
Удельная тепловая мощность	кВт/кг	451	280	300	263
КПД теплотехнический	%	88	85	70	76

### Результаты исследования характеристик МГТУ на частичных нагрузках

Анализ характеристик циклов МГТУ на частичных нагрузках производился на винтовом и генераторном режимах (при постоянном числе оборотов) с блокированной силовой турбиной и свободным ТКУ согласно методикам, предложенным в работах [9-11] и опробованным в работах [12-14]. Результаты исследования МГТД на частичных нагрузках при винтовом и генераторном способах нагружения представлены на рисунке 5.

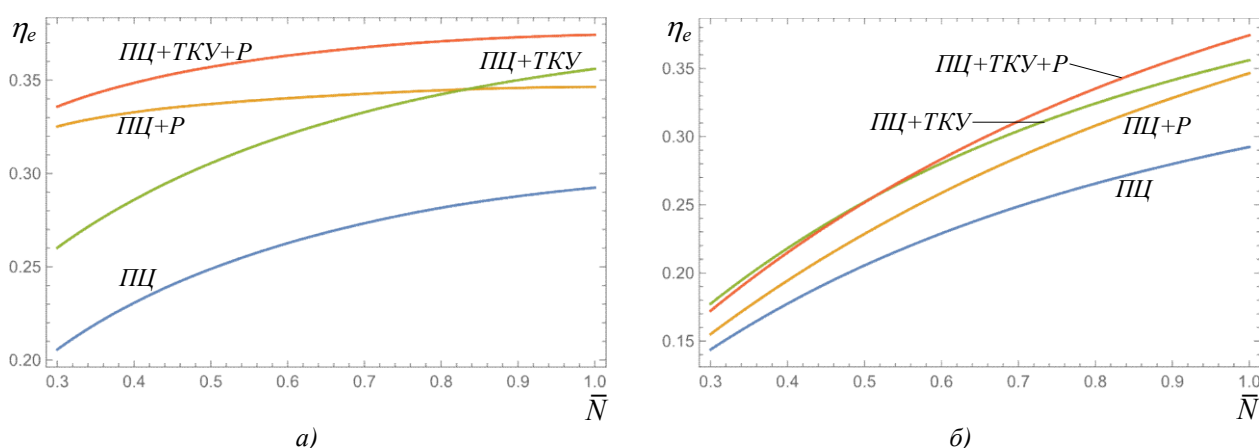


Рисунок 5 – Зависимость КПД МГТД, изображенных на рис 1-4, от относительной нагрузки при винтовом (а) и генераторном (б) способах нагружения

На рисунке 5 приняты следующие обозначения:  $\bar{N} = N/N_0$  – относительная нагрузка, где  $N$  – текущая нагрузка МГТД, а  $N_0$  – номинальная нагрузка. Анализ рисунка 5 показывает, что эффективность схем МГТД, изображенных на рис 1-4 и представленных в таблице 2 при винтовом способе нагружения выше, чем при генераторном. Из рисунка 5б видно, что эффективность схем МГТД распределяется без изменений и на частичных генераторных нагрузках, при этом наименьшее снижение эффективности при уменьшении нагрузки обеспечивают схемы без регенерации (см. рисунки 1 и 3). Для винтового способа нагружения, наоборот – наименьшее снижение эффективности при уменьшении нагрузки обеспечивают схемы с регенерацией (см. рисунки 2 и 4). 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 утилизаторов), что подробно рассмотрено в работе [15].

### Солнечный коллектор

Исследование характеристик ФСК производилось с использованием физико-математических моделей, приведенных в работе [16, 17].

В качестве климатических параметров использовались данные [18] для г. Евпатория (умеренный климат). Для моделирования параболоцилиндрического ФСК были приняты исходные данные, представленные в таблице 3.

Использование воздуха в качестве теплоносителя обусловлено высокими (700...1200 К) температурами на выходе ФСК, при которых наиболее известные термомасла разлагаются, а другие жидкости закипают. С другой стороны, воздух, как теплоноситель создает и определенные трудности, связанные с эффективностью ФСК. Уравнение для определения полезной энергии, произведенной ФСК имеет вид [19]:

$$Q_u = F' \eta_0 I A_s - F' U_L (T_f - T_a) A_p, \quad (1)$$

где  $\eta_0$  – оптический КПД ФСК;  $I$  – интенсивность прямой солнечной радиации, приходящей на ФСК, Вт/м<sup>2</sup>;

$A_s$  – площадь апертуры ФСК, м<sup>2</sup>;

$F'$  – коэффициент эффективности приемника;

$U_L$  – коэффициент тепловых потерь приемника, Вт/(м<sup>2</sup> К);

$T_f$  – средняя температура теплоносителя, К;

$T_a$  – температура окружающей среды, К;

$A_p$  – площадь поверхности абсорбера, м<sup>2</sup>.

Таблица 3 - Параметры ФСК

Наименование параметра	Ед. изм.	Численное значение
Угол раскрытия	–	$\pi/2$
Размер раскрытия зеркала концентратора	м	2
Фокусное расстояние	м	0,5
Наружный диаметр абсорбера	мм	25,4
Наружный диаметр приемника (вакуумированная трубка, металлическая сильфонная с каждой стороны для достижения необходимого вакуума)	мм	50
Пропускательная способность прозрачной изоляции	–	0,97
Поглощательная способность абсорбера	–	0,97
Излучательная способность прозрачной изоляции	–	0,86
Излучательная способность абсорбера [16]	–	$(1,666 \cdot 10^{-4}) T + 3,375 \cdot 10^{-3}$
Отражательная способность зеркала	–	0,935
Ошибка поворота и отслеживания	–	0,994
Точность геометрии зеркал коллектора	–	0,980
Замутнение зеркала	–	0,968
Грязь на элементах сбора тепла	–	0,984
Прочие факторы, влияющие на оптические параметры	–	0,960
Ориентация	–	Север-Юг
Расход теплоносителя	кг/с	1
Род теплоносителя	–	воздух

Коэффициент эффективности приемника в формуле (1) и определяет эффективность ФСК и любого другого коллектора в целом, находится по выражению

$$F' = \frac{1}{1 + \frac{U_L}{U_f}}, \quad (2)$$

где  $U_f$  – коэффициент теплоотдачи от абсорбера к теплоносителю, Вт/(м<sup>2</sup> К).

Из формулы (2) видно, что при  $U_f \gg U_L$  коэффициент эффективности приемника стремится к единице, а поскольку коэффициент теплоотдачи пропорционален теплопроводности теплоносителя, теплоносители стараются выбирать с наиболее высоким ее значением. У воздуха коэффициент теплопроводности очень мал, поэтому, чтобы это компенсировать необходимо увеличить скорость течения теплоносителя в абсорбере, для чего следует уменьшить его поперечное сечение, что, соответственно, увеличит гидравлическое

сопротивление ФСК.

Согласно, например, работе [20] гидравлическое сопротивление цилиндрического канала определяется выражением:

$$\Delta P = \xi_g \frac{l}{d} \rho \frac{u^2}{2}, \quad (3)$$

где  $\xi_g$  – коэффициент гидравлического сопротивления;

$l$  – длина канала, м;

$d$  – диаметр канала, м;

$\rho$  – плотность теплоносителя, кг/м<sup>3</sup>;

$u$  – скорость движения среды, м/с.

Учитывая, данные работы [1] зависимость гидравлических потерь от температуры и давления примет вид:

$$\Delta P(T, P) = \frac{\xi_g}{8} \frac{R T}{P} \frac{F}{S} \left( \frac{G}{S} \right)^2, \quad (4)$$

где  $S$  – площадь проходного сечения канала, м<sup>2</sup>;

$F$  – площадь поверхности канала, м<sup>2</sup>;

$G$  – расход теплоносителя, кг/с;

$R$  – индивидуальная газовая постоянная, Дж/(кг К);

$T$  – температура газа, К;

$P$  – давление газа, Па.

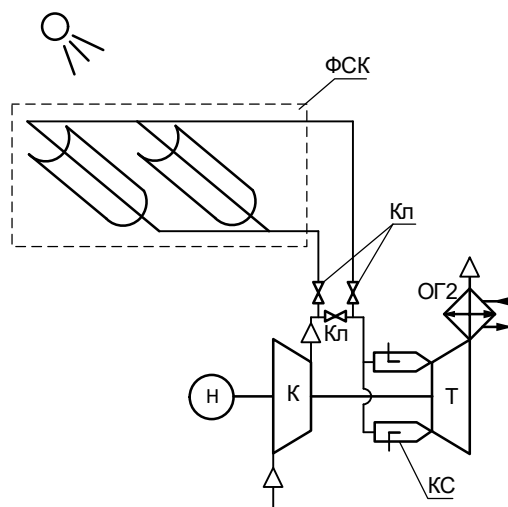
Безусловно, коэффициент гидравлических потерь в формуле (4) тоже зависит от температуры, но зависимость эта мала, поскольку для турбулентного режима течения он пропорционален динамическому коэффициенту вязкости ( $\mu \sim T$ ) в степени 0,2 [20], т.е. при изменении температуры газа в 2 раза он изменится на 15 %.

Кроме того, из формулы (4) следует, что для газа гидравлические потери в канале обратно пропорциональны его давлению.

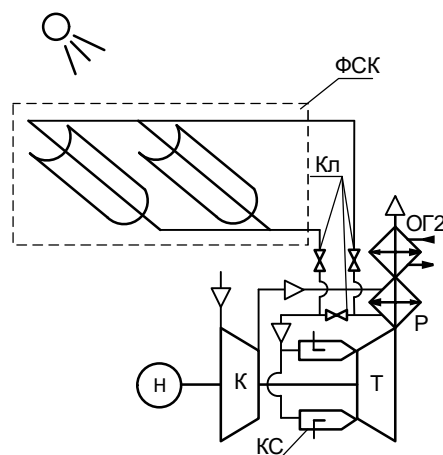
На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что наибольшее влияние ФСК оказывают на эффективность солнечных гибридных МГТУ с малой степенью повышения давления ( $\pi_k$ ), обычно это установки, содержащие регенератор.

**Результаты исследования характеристик солнечных гибридных МГТУ при различных способах нагружения**

Схемы солнечных гибридных МГТУ представлены на рисунках 6-9.



**Рисунок 6 – Схема когенерационной солнечной гибридной МГТУ ПЦ:** ФСК – фокусирующий солнечный коллектор; Кл – переключательные клапаны; остальные обозначения, как на рисунке 1



**Рисунок 7 – Схема когенерационной солнечной гибридной МГТУ ПЦ+Р:** обозначения, как на рисунках 1, 2 и 6

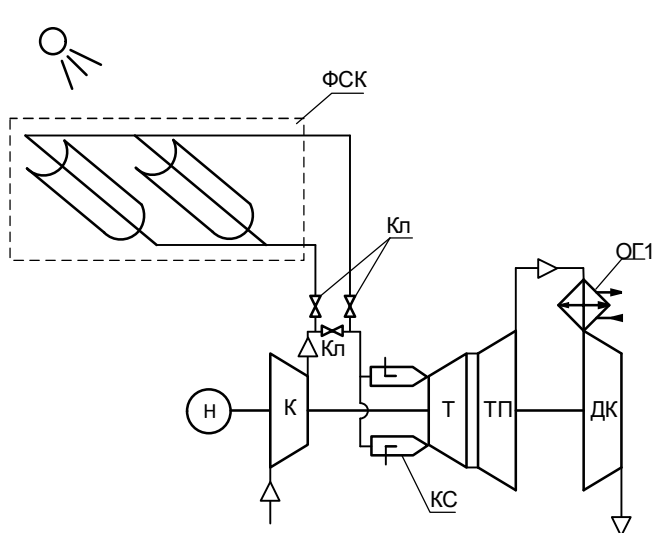


Рисунок 8 – Схема когенерационной солнечной гибридной МГТУ ПЦ+ТКУ: обозначения, как на рисунках 1, 3 и 6

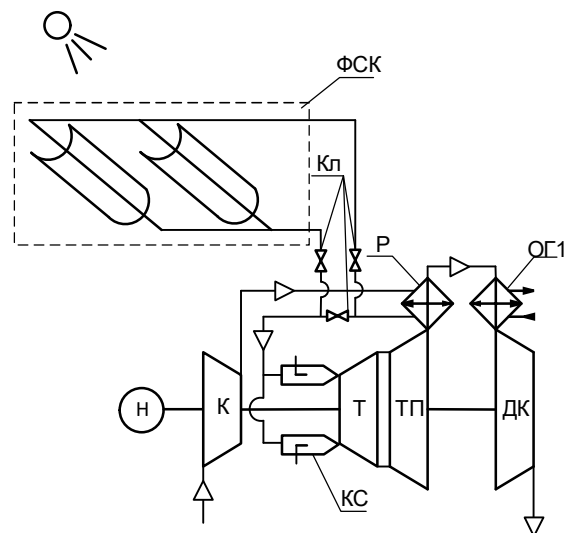


Рисунок 9 – Схема когенерационной солнечной гибридной МГТУ ПЦ+ТКУ+Р: обозначения, как на рисунках 1, 4 и 6

При исследовании солнечных гибридных МГТУ относительная влажность (в %) рассчитывалась в соответствии данными таблицы 1 в зависимости от температуры окружающей среды по формуле:

$$\varphi = 100 (82,866 - 1,4012 T + 0,0088565 T^2 - 0,000024585 T^3 + 2,528873 \times 10^{-8} T^4).$$

При работе на частичных нагрузках оценить топливную экономичность солнечной гибридной МГТУ можно с помощью текущего относительного расхода топлива [1, 2], представляющего собой отношение теплоты, полученной от сжигания топлива к общей теплоте цикла. Относительный расход топлива, который определяется зависимостью:

$$\xi = \frac{Q_{fi}}{Q_{fi} + Q_{ФСКi}}, \quad (5)$$

где  $Q_{fi}$  – тепловая мощность, полученная при сгорании топлива в солнечной гибридной МГТУ для  $i$ -го солнечного часа, кВт;

$Q_{ФСКi}$  – тепловая мощность, полученная в ФСК для  $i$ -го солнечного часа, кВт.

Для номинального режима МГТД выражение (5) выглядит следующим образом:

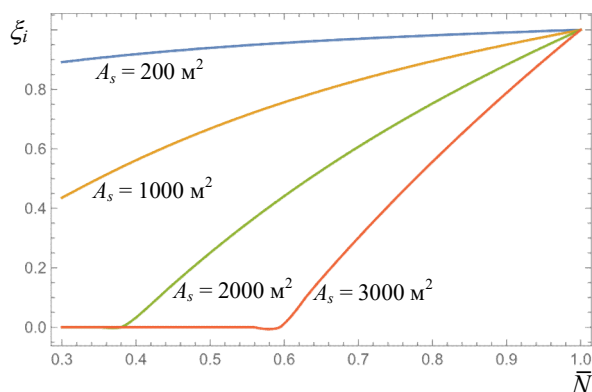
$$\xi_0 = \frac{Q_{fi0}}{Q_{fi0} + Q_{ФСКi}},$$

где  $Q_{fi0}$  – тепловая мощность, полученная при сгорании топлива в солнечной гибридной МГТУ для  $i$ -го солнечного часа при номинальной мощности МГТД, кВт.

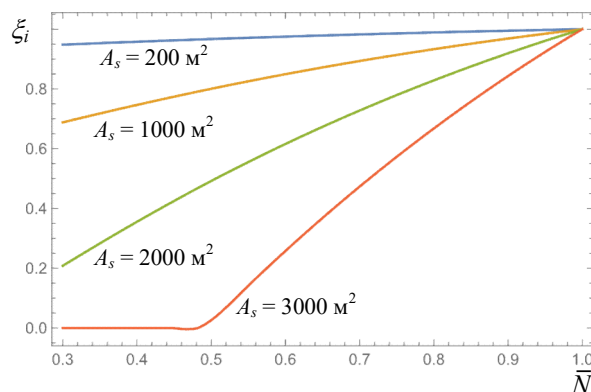
Тогда относительный расход топлива представляет собой отношение:

$$\xi_i = \frac{\xi}{\xi_0}.$$

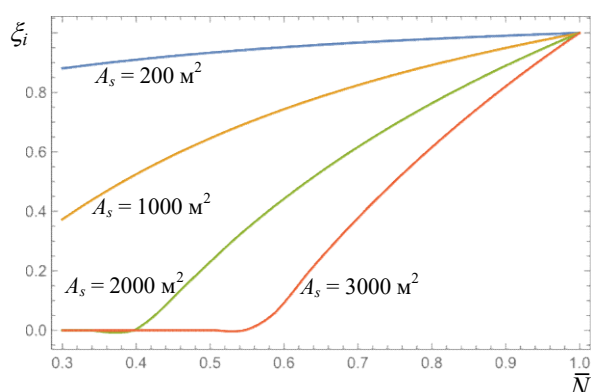
На рисунке 10 и далее приняты обозначения:  $\bar{N} = N/N_0$  – относительная нагрузка, где  $N$  – текущая нагрузка солнечной гибридной МГТУ, а  $N_0$  – номинальная нагрузка солнечной гибридной МГТУ;  $\bar{N}_{зм}$  – механическая мощность МГТД. Зависимости относительного расхода топлива когенерационных солнечных гибридных МГТУ, схемы которых представлены на рисунках 6-9 при винтовом и генераторном способах нагружения от относительной нагрузки ( $\bar{N}$ ) при различных площадях ( $A_s$ ) ФСК изображены на рисунках 10-17.



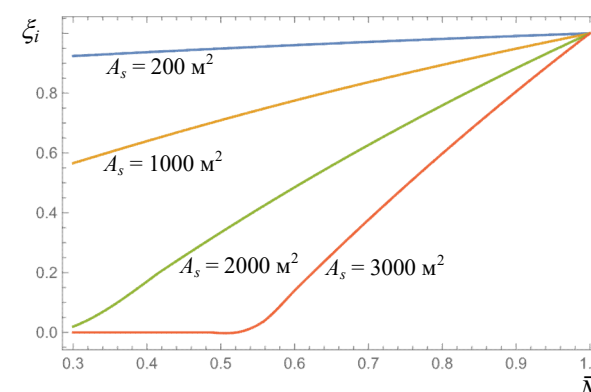
**Рисунок 10** – Зависимость относительного расхода топлива когенерационной солнечной гибридной МГТУ ПЦ от относительной нагрузки при винтовом способе нагружения для июня 09.00



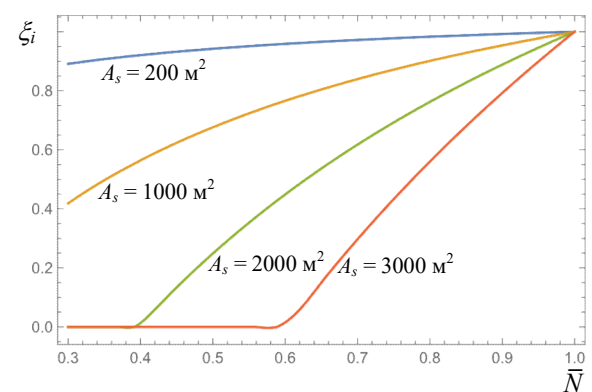
**Рисунок 11** – Зависимость относительного расхода топлива когенерационной солнечной гибридной МГТУ ПЦ от относительной нагрузки при генераторном способе нагружения для июня 09.00



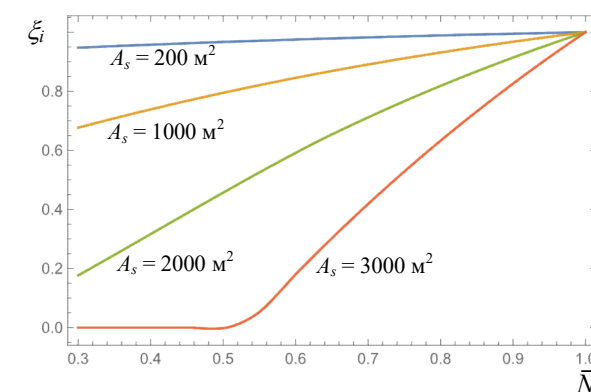
**Рисунок 12** – Зависимость относительного расхода топлива когенерационной солнечной гибридной МГТУ ПЦ+Р от относительной нагрузки при винтовом способе нагружения для июня 09.00



**Рисунок 13** – Зависимость относительного расхода топлива когенерационной солнечной гибридной МГТУ ПЦ+Р от относительной нагрузки при генераторном способе нагружения для июня 09.00

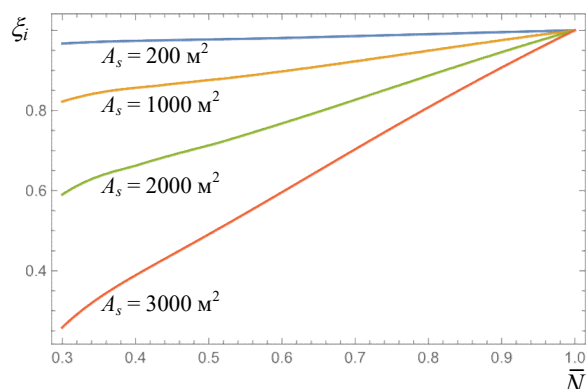


**Рисунок 14** – Зависимость относительного расхода топлива когенерационной солнечной гибридной МГТУ ПЦ+ТКУ от относительной нагрузки при винтовом способе нагружения для июня 09.00

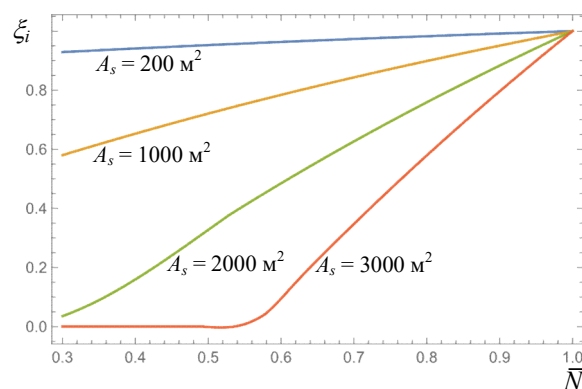


**Рисунок 15** – Зависимость относительного расхода топлива когенерационной солнечной гибридной МГТУ ПЦ+ТКУ от относительной нагрузки при генераторном способе нагружения для июня 09.00





**Рисунок 16 – Зависимость относительного расхода топлива когенерационной солнечной гибридной МГТУ ПЦ+ТКУ+Р от относительной нагрузки при винтовом способе нагружения для июня 09.00**

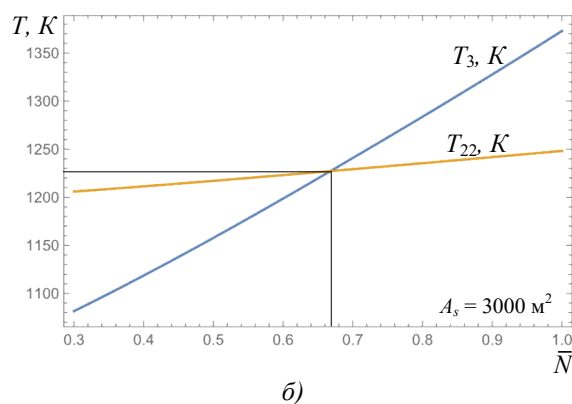
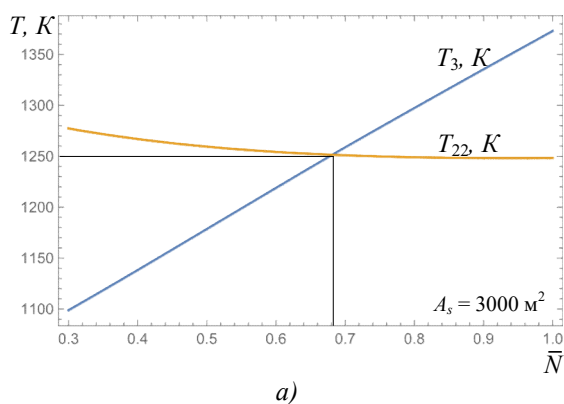


**Рисунок 17 – Зависимость относительного расхода топлива когенерационной солнечной гибридной МГТУ ПЦ+ТКУ+Р от относительной нагрузки при генераторном способе нагружения для июня 09.00**

Из рисунков 10-17 следует, что при винтовом режиме нагружения солнечная гибридная МГТУ имеет более высокую топливную экономичность по сравнению с генераторным, за исключением МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+Р (см. рисунки 16 и 17). Кроме того, при больших площадях ФСК (более 2000 м<sup>2</sup>) на долевых нагрузках при винтовом и генераторном способах нагружения солнечной гибридной МГТУ относительный расход топлива согласно (4) становится равным нулю. Это связано с тем, что температура воздуха на выходе из ФСК становится больше максимальной температуры цикла (см. рисунки 18 и 19). Это, в свою очередь, может нарушить процесс регулирования мощности энергетической установки. Такая задача может иметь два решения:

- 1) ограничение площади ФСК;
- 2) установка охладителя после ФСК (см. рисунок 20) для охлаждения воздуха до требуемой температуры с последующим аккумулированием или утилизацией теплоты.

Очевидно, что первое решение приемлемо для любой из схем, изображенных на рисунках 6-9. В то же время второе решение может быть реализовано только для схем, имеющих высокую степень повышения давления в компрессоре (см. рисунки 6 и 8), поскольку охладитель воздуха создает дополнительное гидравлическое сопротивление (4...6 %) и схемы, представленные на рисунках 7 и 9 очень чувствительны к росту гидравлических потерь [1, 2]. Характер изменения коэффициентов восстановления давления ФСК ( $\varepsilon_{\text{ФСК}}$ ) для схем, изображенных на рисунках 7 и 9 показан на рисунках 21 и 22.



**Рисунок 18 – Зависимость максимальной температуры цикла и температуры на выходе из ФСК ( $T_{22}$ ) когенерационной солнечной гибридной МГТУ ПЦ+Р от относительной нагрузки для июля 12.00:**  
а) винтовой способ нагружения; б) генераторный способ нагружения

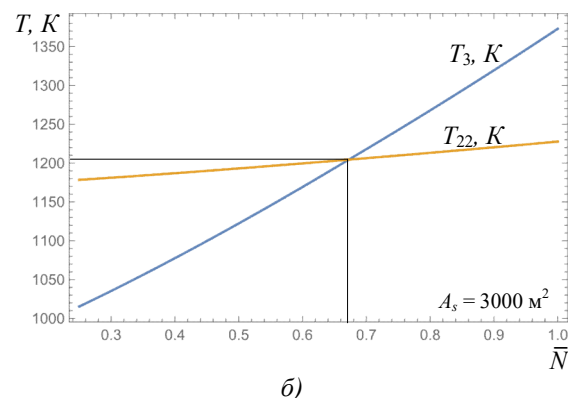
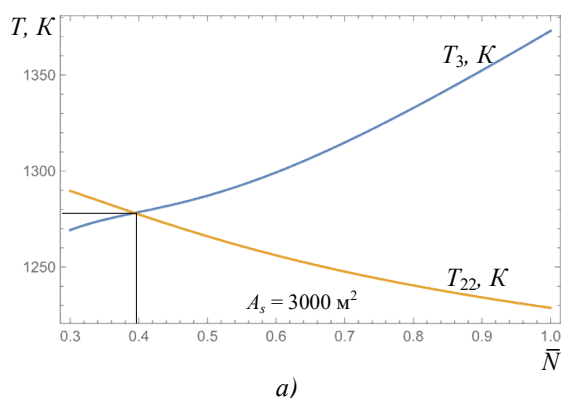


Рисунок 19 – Зависимость максимальной температуры цикла и температуры на выходе из ФСК ( $T_{22}$ ) когенерационной солнечной гибридной МГТУ ПЦ+ТКУ+Р от относительной нагрузки для июля 12.00: а) винтовой способ нагружения; б) генераторный способ нагружения

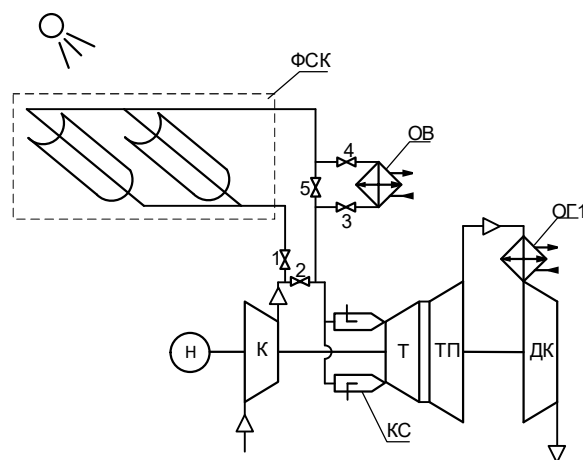


Рисунок 20 – Схема когенерационной солнечной гибридной МГТУ ПЦ+ТКУ: 1-5 – клапаны; ОВ – охладитель воздуха; остальные обозначения, как на рисунках 1, 3 и 6

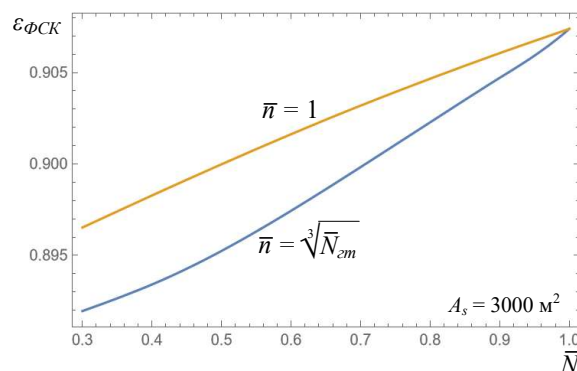
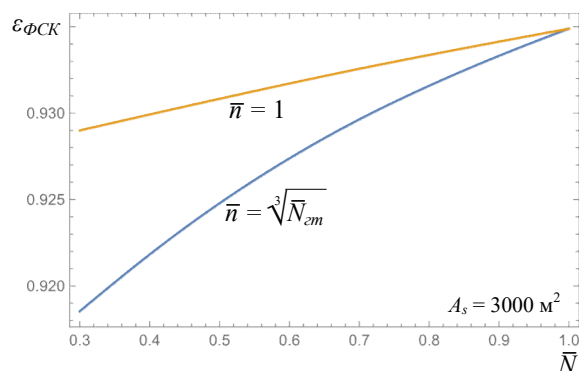
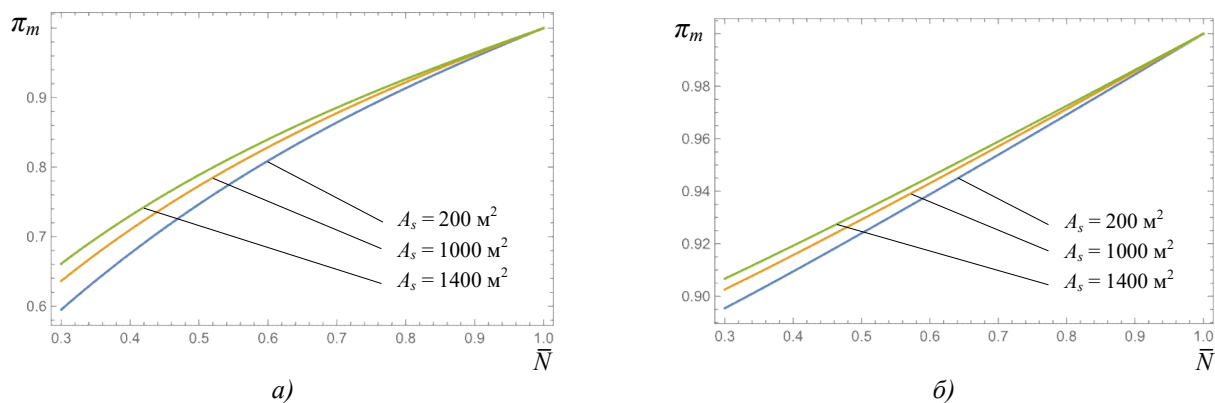


Рисунок 21 – Зависимость коэффициента восстановления давления ФСК когенерационной солнечной гибридной МГТУ ПЦ+Р от нагрузки при винтовом и генераторном способах нагружения для июля 12.00

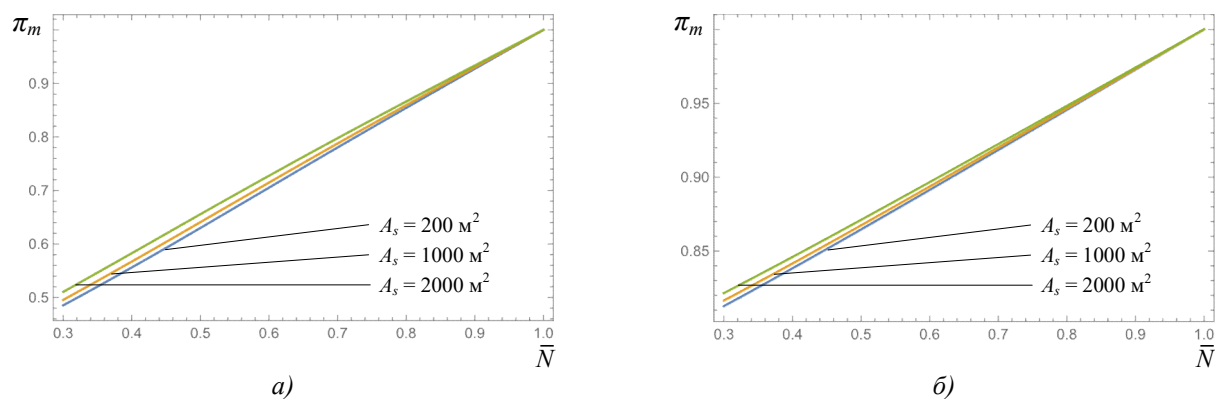
Рисунок 22 – Зависимость коэффициента восстановления давления ФСК когенерационной солнечной гибридной МГТУ ПЦ+ТКУ+Р от нагрузки при винтовом и генераторном способах нагружения для июля 12.00

Анализ рисунков 21 и 22 показывает, что коэффициент восстановления давления ФСК установки на базе ГТД ПЦ+Р выше, чем аналогичное на базе ПЦ+ТКУ+Р поскольку  $\pi_k$ , а следовательно и давление на входе в ФСК в установке на базе ГТД ПЦ+Р выше аналогичного на базе ПЦ+ТКУ+Р (см. выражение (4)). Характер изменения  $\varepsilon_{\text{ФСК}}$  связан с тем, что при генераторном нагружении на частичных нагрузках расход воздуха возрастает и в соответствии с (4) – гидравлическое сопротивление, а при винтовом – наоборот. Однако, при винтовом

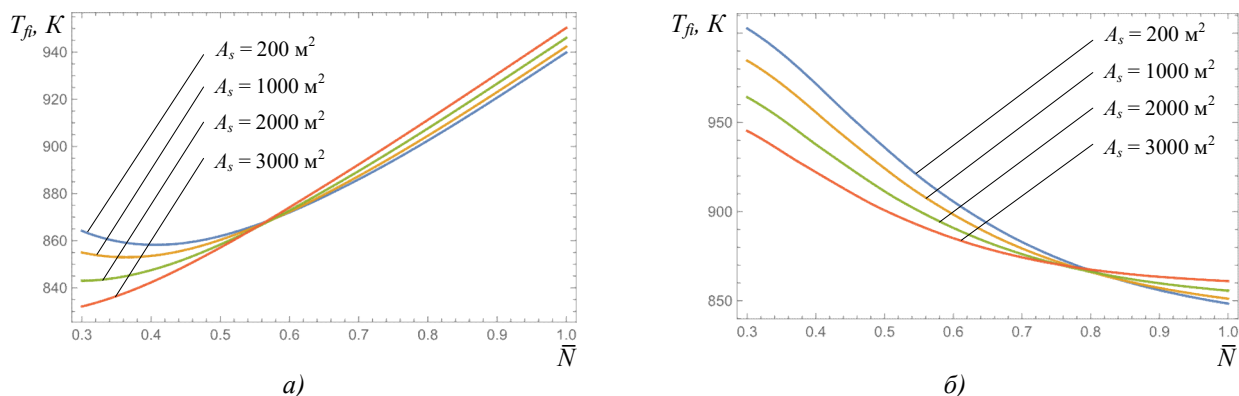
способе нагружения снижение нагрузки осуществляется в основном за счет снижения расхода рабочего тела, а при генераторном – за счет снижения максимальной температуры цикла ( $T_3$ ). Это наглядно демонстрируют рисунки 18 и 19. Поэтому степень повышения давления в компрессоре  $\pi_k$  и, соответственно степень расширения в турбине  $\pi_m$  при винтовом нагружении снижаются с понижением нагрузки существенно быстрее, чем при генераторном (см рисунки 23 и 24). Следовательно, хотя гидравлическое сопротивление ФСК при винтовом нагружении и уменьшается со снижением нагрузки, но коэффициент восстановления давления также уменьшается.



**Рисунок 23 – Зависимость степени расширения в турбине когенерационной солнечной гибридной МГТУ ПЦ+Р от относительной нагрузки для июля 12.00:**  
а) винтовой способ нагружения; б) генераторный способ нагружения



**Рисунок 24 – Зависимость степени расширения в турбине когенерационной солнечной гибридной МГТУ ПЦ+ТКУ+Р от относительной нагрузки для июля 12.00:**  
а) винтовой способ нагружения; б) генераторный способ нагружения



**Рисунок 25 – Зависимость температуры перед ФСК когенерационной солнечной гибридной МГТУ от относительной нагрузки при винтовом способе нагружения для июля 12.00:** а) ПЦ+Р; б) ПЦ+ТКУ+Р

Анализ рисунков 19 и 24 для МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+Р показывает, что сильное уменьшение  $\pi_m$  (см. рисунок 24) при умеренном снижении  $T_3$  (см. рисунок 19) на винтовом режиме нагружения по сравнению с генераторным приводит к росту температуры перед ФСК ( $T_{fi}$ ) и, следовательно (см. рисунок 25б), снижению его КПД (см. рисунок 26б), что, в свою очередь, ведет к уменьшению топливной экономичности всей установки (см. рисунки 16 и 17).

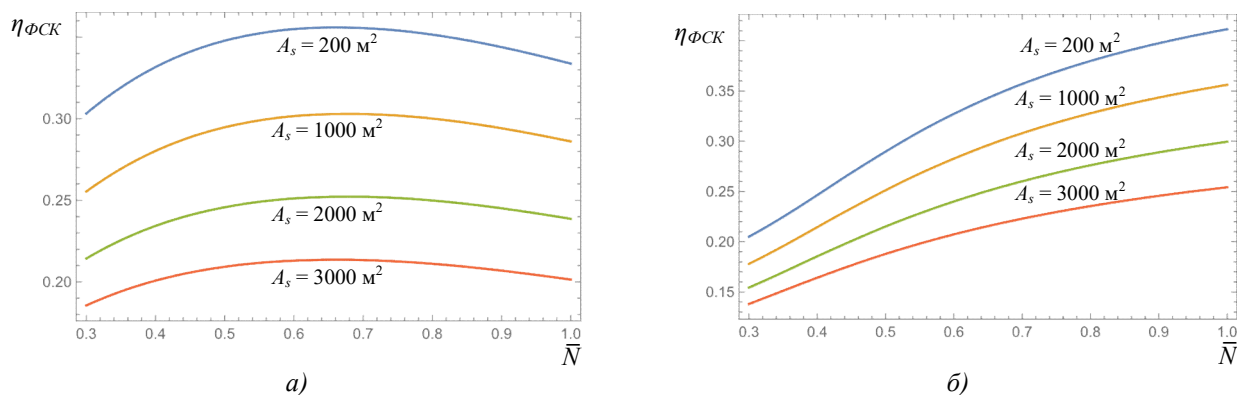


Рисунок 26 – Зависимость КПД ФСК когенерационной солнечной гибридной МГТУ от относительной нагрузки при винтовом способе нагружения для июля 12.00: а) ПЦ+Р; б) ПЦ+ТКУ+Р

В тоже время, зависимости, представленные на рисунках 25а и 26а характерны не только для МГТУ на базе ПЦ+Р, но и для установок без регенератора на базе ПЦ и ПЦ+ТКУ при винтовом способе нагружения. Для установок на базе ПЦ и ПЦ+ТКУ снижение  $T_{fi}$  на частичных винтовых нагрузках связано с уменьшением  $\pi_k$ . Характер кривых, представленных на рисунке 26а обусловлен двумя факторами: первый – снижение  $T_{fi}$  на частичных винтовых нагрузках, что способствует росту КПД ФСК; второй – уменьшение коэффициента эффективности приемника ФСК с уменьшением расхода воздуха, что способствует снижению КПД ФСК.

Зависимости относительного расхода топлива когенерационных солнечных гибридных МГТУ, схемы которых представлены на рисунках 6-9 от относительной нагрузки ( $\bar{N}$ ) при площади апертуры ФСК  $A_s = 3000 \text{ м}^2$  в различные месяцы года для винтового и генераторного способов нагружения изображены на рисунках 27-30.

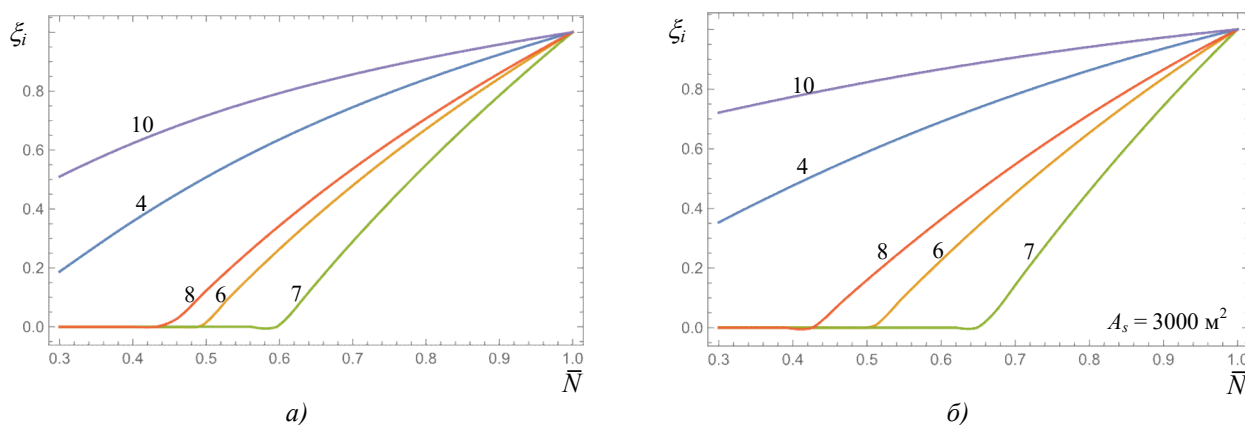


Рисунок 27 – Зависимость относительного расхода топлива когенерационной солнечной гибридной МГТУ ПЦ от относительной нагрузки для 12.00 при площади апертуры ФСК  $A_s = 3000 \text{ м}^2$ : а) винтовой способ нагружения; б) генераторный способ нагружения

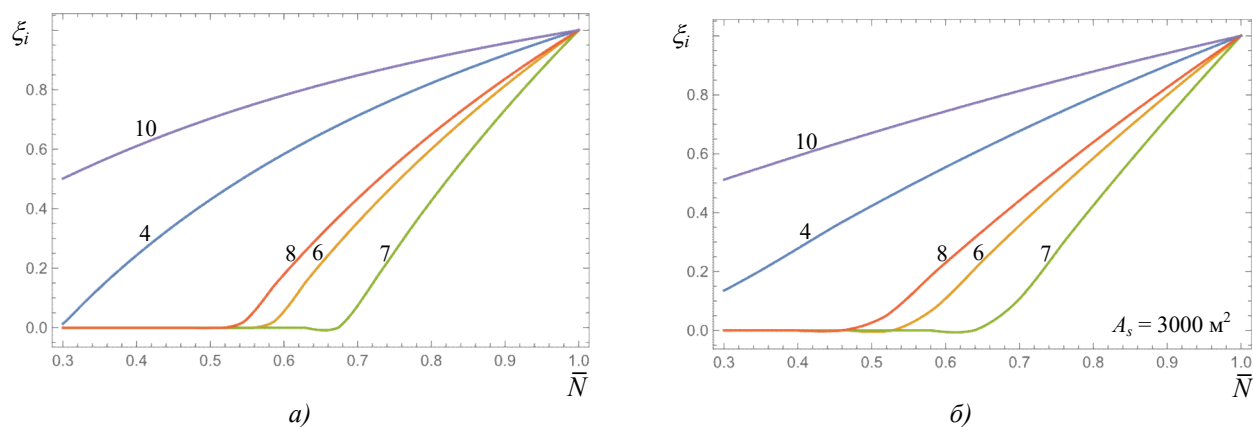


Рисунок 28 – Зависимость относительного расхода топлива когенерационной солнечной гибридной МГТУ ПЦ+Р от относительной нагрузки для 12.00 при площади апертуры ФСК  $A_s = 3000 \text{ м}^2$ : а) винтовой способ нагружения; б) генераторный способ нагружения

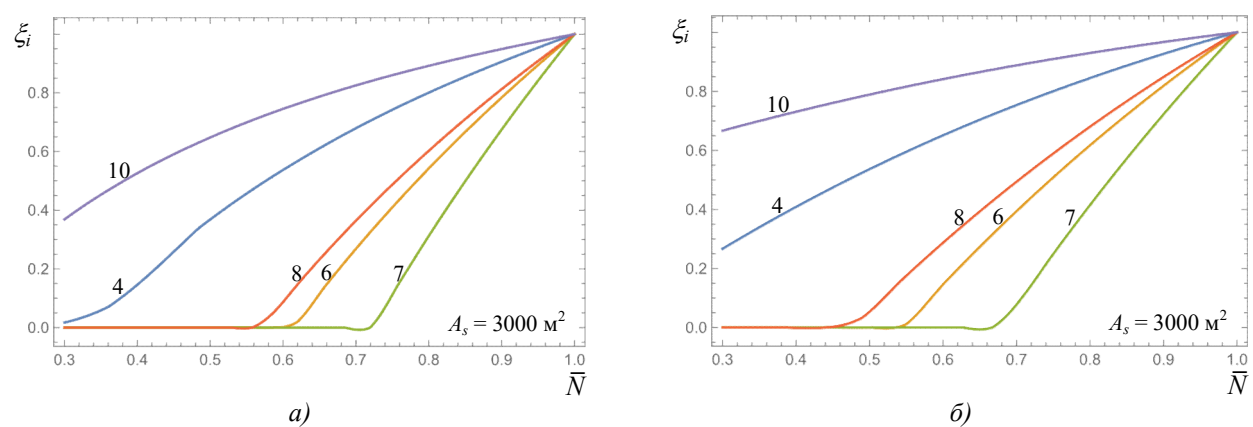


Рисунок 29 – Зависимость относительного расхода топлива когенерационной солнечной гибридной МГТУ ПЦ+ТКУ от относительной нагрузки для 12.00 при площади апертуры ФСК  $A_s = 3000 \text{ м}^2$ : а) винтовой способ нагружения; б) генераторный способ нагружения

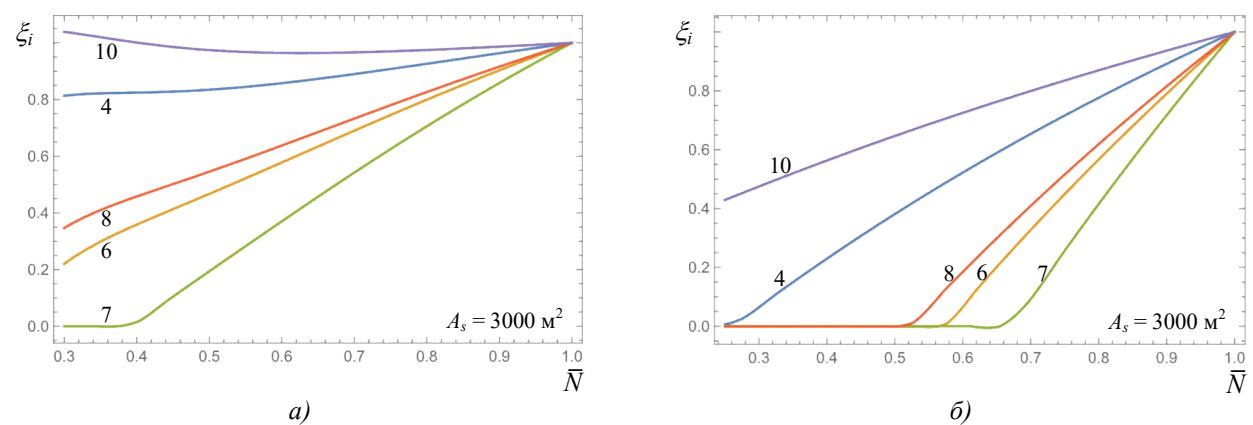


Рисунок 30 – Зависимость относительного расхода топлива когенерационной солнечной гибридной МГТУ ПЦ+ТКУ+Р от относительной нагрузки для 12.00 при площади апертуры ФСК  $A_s = 3000 \text{ м}^2$ : а) винтовой способ нагружения; б) генераторный способ нагружения

Анализ рисунков 27-30 показывает, что на частичных нагрузках при винтовом и генераторном режимах нагружения солнечной гибридной МГТУ температура воздуха на выходе из ФСК становится больше максимальной температуры цикла только в летние месяцы для умеренного климата для всех рассмотренных выше схем энергетических установок. Стоит отметить, что чем больше величина относительной нагрузки, при которой наступает равенство нулю относительного расхода топлива, тем эффективней работа гибридной установки на

частичных нагрузках в солнечное время при дальнейшем снижении нагрузки.

Оценить эффективность работы солнечной гибридной МГТУ на частичных нагрузках можно с помощью коэффициента использования топлива, представляющего отношение мощности МГТУ к теплоте затраченного в цикле топлива.

$$\xi_f = \frac{N_{ei}}{Q_{fi}}, \quad (6)$$

где  $N_{ei}$  – механическая мощность, полученная в солнечной гибридной МГТУ для  $i$ -го солнечного часа, кВт.

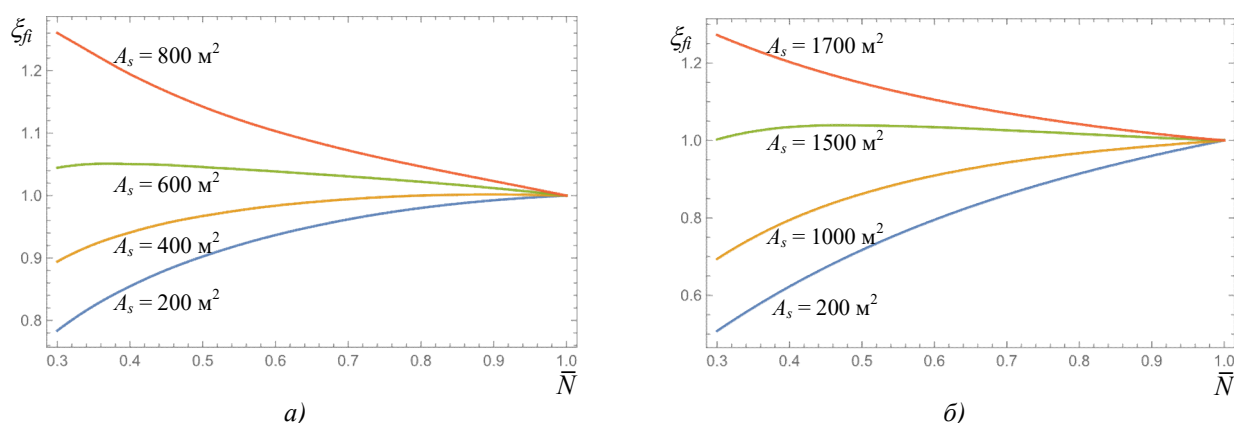
Для номинального режима МГТД выражение (6) выглядит следующим образом:

$$\xi_{f0} = \frac{N_{ei0}}{Q_{fi0}}.$$

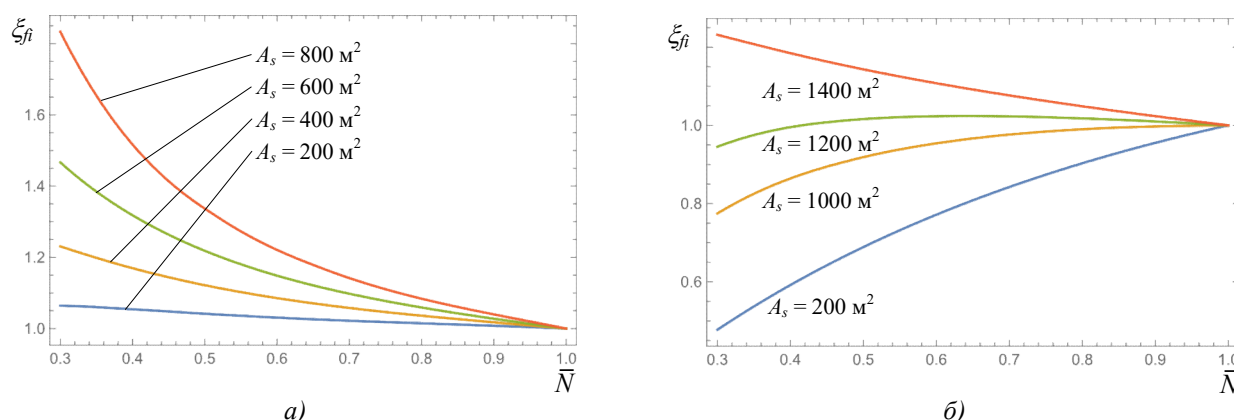
Тогда относительный коэффициент использования топлива представляет собой отношение:

$$\xi_{fi} = \frac{\xi_f}{\xi_{f0}}.$$

Зависимость относительного коэффициента использования топлива от относительной нагрузки при различных площадях апертуры ФСК представлена на рисунках 31-34.

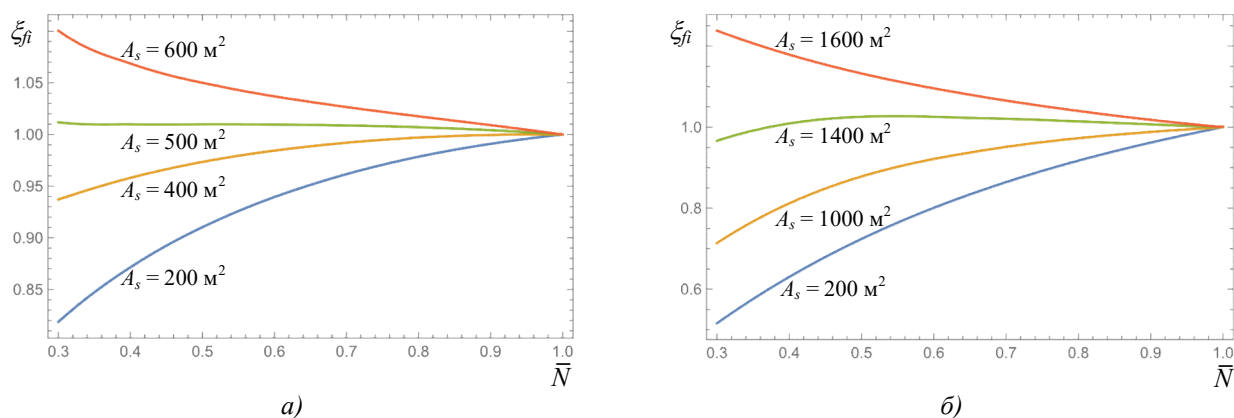


**Рисунок 31 – Зависимость относительного коэффициента использования топлива когенерационной солнечной гибридной МГТУ ПЦ от относительной нагрузки для июня 09.00:**  
а) винтовой способ нагружения; б) генераторный способ нагружения



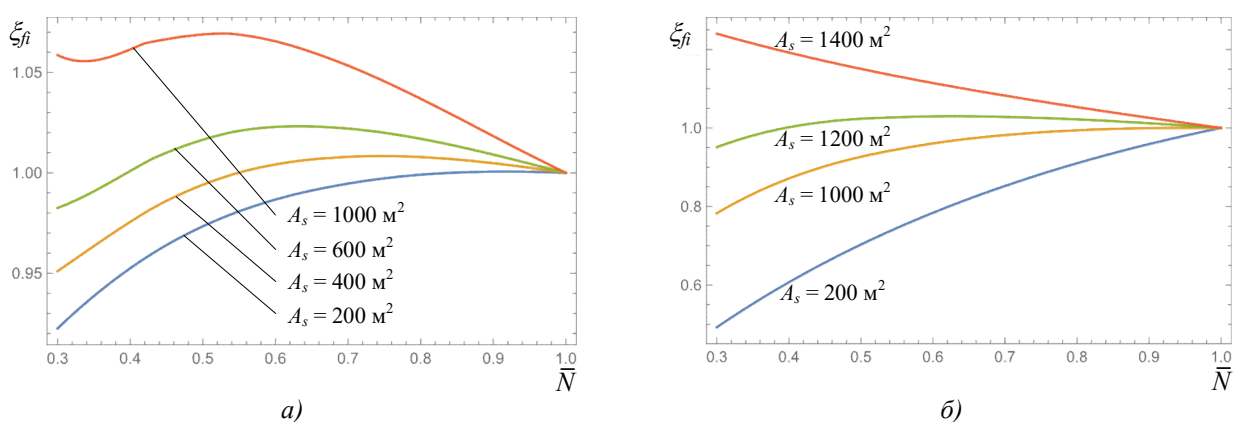
**Рисунок 32 – Зависимость относительного коэффициента использования топлива когенерационной солнечной гибридной МГТУ ПЦ+Р от относительной нагрузки для июня 09.00:**  
а) винтовой способ нагружения; б) генераторный способ нагружения





**Рисунок 33 – Зависимость относительного коэффициента использования топлива когенерационной солнечной гибридной МГТУ ПЦ+ТКУ от относительной нагрузки для июня 09.00:**

а) винтовой способ нагружения; б) генераторный способ нагружения



**Рисунок 34 – Зависимость относительного коэффициента использования топлива когенерационной солнечной гибридной МГТУ ПЦ+ТКУ+Р от относительной нагрузки для июня 09.00:**

а) винтовой способ нагружения; б) генераторный способ нагружения

Анализ рисунков 31-34 показывает, что в летний период при определенных площадях апертуры ФСК эффективность солнечных гибридных МГТУ на долевых нагрузках превышает аналогичную для номинального режима во всем диапазоне нагружения. Чем более эффективна гибридная энергетическая установка на номинальном режиме, тем меньше пороговое значение площади апертуры ФСК. При винтовом способе нагружения это пороговое значение для нерегенеративных установок (см. рисунки 6 и 8) примерно в 3 раза меньше, чем при генераторном. Для установки на базе МГТД ПЦ+Р это соотношение превышает порядок (см. рисунок 32), а для установки на базе МГТД ПЦ+ТКУ+Р – остается примерно на прежнем уровне (см. рисунок 34). Поэтому использование установок на базе МГТД ПЦ+ТКУ+Р на частичных нагрузках при винтовом способе нагружения нецелесообразно. Однако при наличии нескольких агрегатов в составе установки возможно использование солнечной гибридной МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+Р, как наиболее экономичную на номинальной нагрузке, в базовом режиме, а например, аналогичную МГТУ на базе ПЦ+Р – в маневровом.

### Заключение

В настоящем исследовании решены следующие задачи.

1. Показано, что при снижении нагрузки солнечных гибридных МГТУ в летнее солнечное время при больших площадях апертуры ФСК имеет место превышение температуры на выходе из ФСК над максимальной температурой цикла для всех способов нагружения. Для схем МГТД без регенератора эта проблема может быть решена установкой дополнительного охладителя. Для схем МГТД с регенератором возможно только ограничение площади апертуры ФСК.



2. Определено, что чем больше величина относительной нагрузки гибридных солнечных МГТУ, при которой наступает равенство нулю относительного расхода топлива, тем эффективней работа установки на частичных нагрузках в солнечное время при дальнейшем снижении нагрузки. Однако это применимо только для исследованных схем МГТУ (см. рисунки 6 и 8) без регенератора. При этом эффективность при винтовом способе нагружения выше, чем при генераторном.

3. Установлено, что в солнечное время при определенных площадях апертуры ФСК относительный коэффициент использования топлива гибридных солнечных МГТУ не зависит от нагрузки не зависимо от схемы базовой конфигурации МГТД. При превышении этого порогового значения топливная экономичность таких МГТУ только возрастает. При винтовом способе нагружения эта площадь значительно ниже, чем при генераторном.

4. Выявлено, что использование солнечных установок на базе МГТД ПЦ+ТКУ+Р на частичных нагрузках при винтовом способе нагружения неэффективно. Однако в случае многоагрегатной энергетической установки локального объекта их можно использовать в базовом режиме ввиду высокой эффективности на номинальных нагрузках, а установки на базе ПЦ+ТКУ – в маневровом.

Окончательный вывод о целесообразности выбора той или иной схемы МГТД и площади апертуры ФСК для гибридных солнечных МГТУ можно только после технико-экономического анализа всей совокупности режимов нагружения энергетической установки и режимов потребления локального объекта.

*Исследование выполнено по госбюджетной теме ИПТС «Создание научных основ разработки гибких мультигенерационных установок с использованием возобновляемых источников энергии и местных ресурсов холода в условиях климатических изменений» (№ госрегистрации 121122300068-6.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дологлонян А.В. Термодинамические характеристики сложных циклов микрогазотурбинных двигателей с интегрированным фокусирующим солнечным коллектором / А.В. Дологлонян, В.Т. Матвеевко, И.Н. Стаценко // Известия РАН. Энергетика. 2021. № 2. С. 128-150.
2. Термодинамические характеристики гибридных солнечных микрогазотурбинных установок в условиях тропического климата / А.В. Дологлонян, Д.С. Стребков, В.Т. Матвеевко, И.Н. Стаценко // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2021. Т. 68. № 2(43). С. 20-35. – DOI 10.22314/2658-4859-2021-68-2-20-35.
3. Матвеевко В.Т. Глубокая утилизация теплоты в газотурбинных двигателях с турбиной перерасширения / В.Т. Матвеевко // Промышленная теплотехника. 1997. Т. 19. № 4-5. С. 81-85.
4. 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 ():V008T23A021. doi:10.1115/GT2016-57008.
5. Deng, Qing-Hua & Shao, Shuai & Fu, Lei & Luan, Hai-Feng. (2018). An Integrated Design and Optimization Approach for Radial Inflow Turbines – Part I: Automated Preliminary Design. Applied Sciences. 8. 2038. 10.3390/app8112038.
6. Vick, Michael & Young, Trent & Kelly, Matthew & Tuttle, Steven & Hinnant, Katherine. (2016). A Simple Recuperated Ceramic Microturbine: Design Concept, Cycle Analysis, and Recuperator Component Prototype Tests. V008T23A030. 10.1115/GT2016-57780.
7. Арбеков А.Н. Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок / А.Н. Арбеков, А.Ю. Вараксин, Э.А. Мнушин, В.Е и др. М. Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 678 с.
8. Дологлонян А.В. Оптимизация степени регенерации для циклов газотурбинных установок с кожухотрубными регенераторами / А.В. Дологлонян, В.Т. Матвеевко, В.А. Очеретяный // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2021. № 4 (348). С. 19-27.
9. Matviienko V. Variable regimes operation of cogenerative gas turbine engines with overexpansion turbine/ V. Matviienko, V. Ocheretianiy// Proc.coligs of ASME Turbo Expo 2010: Power of Land, Sea and Air 'GT2010, June 14-18, 2010, Glasgow, UK, GT2010-22029.
10. Матвеевко 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.
11. Переходные процессы в газотурбинных установках / Под ред. д-ра техн. наук, проф. И. В. Котляра. Л.: Машиностроение. [Ленингр. отд-ние], 1973. 254 с.
12. Матвеевко В.Т. Переменные режимы работы замкнутых газотурбинных установок в пропульсивных комплексах подводной техники / В.Т. Матвеевко, А.В. Дологлонян, В.А. Очеретяный, // Морские

интеллектуальные технологии. СПб.: НИЦ МИТ, 2020. № 3(49). Т.1. С. 77-83.

13. Дологлонян А.В. Характеристики гибридных солнечных комбинированных микрогазотурбинных установок на частичных нагрузках при различных способах нагружения / А.В. Дологлонян, В.Т. Матвеев, А.Г. Клименко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2023. № 4 (360). С. 112-125.

14. Матвеев В.Т. Управление характеристиками замкнутых газотурбинных установок пропульсивных комплексов подводных судов / В.Т. Матвеев, А.В. Дологлонян, В.А. Очеретяный // Морские интеллектуальные технологии. СПб.: НИЦ МИТ, 2021. № 4 (54) Т.1. С. 71-75.

15. Дологлонян А.В., Матвеев 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. DOI: 10.37220/МИТ.2023.60.2.013

16. Дологлонян А.В. Исследование влияния климата на эффективность гибридных солнечных микрогазотурбинных установок / А.В. Дологлонян, В.Т. Матвеев, А.Г. Клименко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2022. № 4 (354). С. 65-72.

17. Forristall, R. Heat Transfer Analysis and Modeling of a Parabolic Trough Solar Receiver Implemented in Engineering Equation Solver. United States: N. p., 2003. Web. doi:10.2172/15004820.

18. Справочник по климату СССР, вып. 10 / под ред. Е.И. Ильиных. – Л.: Гидрометеиздат, 1966. 125 с.

19. Даффи Дж. А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии / Дж.А. Даффи, У.А. Бекман. М.: Мир, 1977. 420 с.

20. Вукалович М.П. Термодинамика / М.П. Вукалович, И.И. Новиков. М.: Машиностроение, 1972. 672 с.

Дологлонян Андрей Вартазарович  
ФГБНУ «Институт природно-  
технических систем»,  
г. Севастополь  
ФГАОУ ВО «Севастопольский  
государственный университет», г.  
Севастополь  
заведующий лабораторией,  
кандидат технических наук,  
доцент, ведущий научный  
сотрудник  
299011, Севастополь, Ленина, 28  
e-mail: dologlonyan@mail.ru

Матвеев Валерий Тимофеевич  
ФГБНУ «Институт природно-  
технических систем»,  
г. Севастополь  
Главный научный сотрудник,  
доктор технических наук,  
профессор  
299011, Севастополь, Ленина, 28  
e-mail: mvt3900@mail.ru

Клименко Александр  
Георгиевич  
ФГБНУ «Институт природно-  
технических систем», г.  
Севастополь  
ведущий инженер  
299011, Севастополь, Ленина, 28  
e-mail: kag195877@gmail.com

A.V. DOLOGLONYAN, V.T. MATVIENKO, A.G. KLIMENKO

## CHARACTERISTICS OF SOLAR HYBRID MICRO GAS TURBINE PLANTS AT PARTIAL LOADS UNDER DIFFERENT LOADING METHODS

**Abstract.** The operation of solar hybrid power plants is often carried out at partial loads, depending on the operating conditions. Therefore, it is necessary to evaluate their characteristics and efficiency in variable operating modes. The subject of consideration in the article is the study of the influence of gas turbine engine circuits on the efficiency of solar hybrid micro gas turbine plants (MGTP) when operating at partial loads in screw and generator modes of operation. It has been established that with large aperture areas of the focusing solar collector (FSC) and operation at partial loads in summer, the air temperature at the outlet of their FSC exceeds the maximum cycle temperature. This necessitates either limiting the FSC aperture area for engines with low air pressure (0.4...0.6 MPa) after the compressor, or installing an additional air cooler for engines with high air pressure (more than 1 MPa) after the compressor. It is shown that with a decrease in the load of a solar hybrid micro gas turbine plant, in contrast to a conventional one, in solar time leads to an increase in its efficiency for any scheme with FSC aperture areas larger than the threshold ones. It has been determined that the greater the value of the relative load, at which the relative fuel consumption becomes equal to zero, the more efficient the operation of the installation at partial loads in solar time with a further decrease in the load. It has been determined that with the screw loading method, the efficiency indicators of solar hybrid MGTPs are higher than with the generator one.

**Keywords:** micro gas turbine plant, microturbine, heat recovery, concentrating solar collector, turbocharger utilizer, partial loads.

## BIBLIOGRAPHY

1. Dologlonyan A.V. Termodinamicheskie harakteristiki slozhnykh ciklov mikrogazoturbinnyykh dvigatelej c

- integriruyemyy fokusiruyushchimy solnechnyy kolektor / A.V. Dologlonyan, V.T. Matveenko, I.N. Stacenko // Izvestiya RAN. Energetika. 2021. № 2. S. 128-150.
2. Termodinamicheskiye harakteristiki gibridnykh solnechnykh mikrogazoturbinykh ustanovok v usloviyakh tropicheskogo klimata / A.V. Dologlonyan, D.S. Strebkov, V.T. Matveenko, I.N. Stacenko // Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK. 2021. T. 68. № 2(43). S. 20-35. – DOI 10.22314/2658-4859-2021-68-2-20-35.
3. Matveenko V.T. Glubokaya utilizatsiya teploty v gazoturbinykh dvigatelyakh s turbinoj pererasshireniya / V.T. Matveenko // Promyshlennaya teplotekhnika. 1997. T. 19. № 4-5. S. 81-85.
4. 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 ():V008T23A021. doi:10.1115/GT2016-57008.
5. Deng, Qing-Hua & Shao, Shuai & Fu, Lei & Luan, Hai-Feng. (2018). An Integrated Design and Optimization Approach for Radial Inflow Turbines – Part I: Automated Preliminary Design. Applied Sciences. 8. 2038. 10.3390/app8112038.
6. Vick, Michael & Young, Trent & Kelly, Matthew & Tuttle, Steven & Hinnant, Katherine. (2016). A Simple Recuperated Ceramic Microturbine: Design Concept, Cycle Analysis, and Recuperator Component Prototype Tests. V008T23A030. 10.1115/GT2016-57780.
7. Arbekov A.N. Teoriya i proektirovaniye gazoturbinykh i kombinirovannykh ustanovok / A.N. Arbekov, A.YU. Varaksin, E.A. Mnushin, V.E i dr. M. Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Bauman, 2017. 678 s.
8. Dologlonyan A.V. Optimizatsiya stepeni regeneratsii dlya tsiklov gazoturbinykh ustanovok s kozhuhotrubnymi regeneratsionnyimi / A.V. Dologlonyan, V.T. Matveenko, V.A. Ocheretyanyj // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. Orel: OGU im. I.S. Turgeneva, 2021. № 4 (348). S. 19-27.
9. Matvienko V. Variable regimes operation of cogenerative gas turbine engines with overexpansion turbine/ V. Matvienko, V. Ocheretianiy // Proceedings of ASME Turbo Expo 2010: Power of Land, Sea and Air 'GT2010, June 14-18, 2010, Glasgow, UK, GT2010-22029.
10. Matveenko V.T. Teplotekhnicheskiye harakteristiki kogeneratsionnykh gazoturbogeneratorov s regeneratsiei teploty pri peremennom rezhime raboty // Aviacionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya: sb. nauch. tr. Har'kov: NAU «HAI», 2001 Vyp. 23 S. 95-98.
11. Perekhodnyye protsessy v gazoturbinykh ustanovkakh / Pod red. d-ra tekhn. nauk, prof. I. V. Kotlyara. L.: Mashinostroeniye. [Leningr. otd-nie], 1973. 254 s.
12. Matveenko V.T. Peremennyye rezhimy raboty zamknytykh gazoturbinykh ustanovok v propul'sivnykh kompleksakh podvodnoy tekhniki / V.T. Matveenko, A.V. Dologlonyan, V.A. Ocheretyanyj, // Morskiye intellektual'nye tekhnologii. SPb.: NIC MIT, 2020. № 3(49). T.1. S. 77-83.
13. Dologlonyan A.V. Harakteristiki gibridnykh solnechnykh kombinirovannykh mikrogazoturbinykh ustanovok na chastichnykh nagruzkakh pri razlichnykh sposobakh nagruzeniya/ A.V. Dologlonyan, V.T. Matveenko, A.G. Klimenko // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. Orel: OGU im. I.S. Turgeneva, 2023. № 4 (360). S. 112-125.
14. Matveenko V.T. Upravleniye harakteristikami zamknytykh gazoturbinykh ustanovok propul'sivnykh kompleksov podvodnykh sudov / V.T. Matveenko, A.V. Dologlonyan, V.A. Ocheretyanyj // Morskiye intellektual'nye tekhnologii. SPb.: NIC MIT, 2021. № 4 (54) T.1. S. 71-75.
15. Andrey V. Dologlonyan, Valeriy T. Matvienko, Alexandr G. Klimenko Efficiency of combined gas turbine plants at partial loads under different types of loading, Marine intellectual technologies. 2023. № 2 part 1, P. 104-115. DOI: 10.37220/MIT.2023.60.2.013
16. Dologlonyan A.V. Issledovaniye vliyaniya klimata na effektivnost' gibridnykh solnechnykh mikrogazoturbinykh ustanovok / A.V. Dologlonyan, V.T. Matveenko, A.G. Klimenko // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – Orel: OGU im. I.S. Turgeneva, 2022. № 4 (354). S. 65-72..
17. Forristall, R. Heat Transfer Analysis and Modeling of a Parabolic Trough Solar Receiver Implemented in Engineering Equation Solver. United States: N. p., 2003. Web. doi:10.2172/15004820.
18. Spravochnik po klimatu SSSR, vyp. 10 / pod red. E.I. Il'inykh. – L.: Gidrometeoizdat, 1966. 125 s.
19. Daffi Dzh. A. Teplovyye protsessy s ispol'zovaniem solnechnoy energii / Dzh.A. Daffi, U.A. Bekman. M.: Mir, 1977. 420 s.
20. Vukalovich M.P. Termodinamika / M.P. Vukalovich, I.I. Novikov. M.: Mashinostroeniye, 1972. 672 s.

**Dologlonyan Andrey Vartazarovich**  
Institute of Nature and Technical  
Systems, Sevastopol  
Sevastopol State University  
PhD, Associate Professor, Leading  
Researcher, chief of laboratory  
299011, Sevastopol, Lenina St., 28  
e-mail: dologlonyan@mail.ru

**Matveenko Valeriy Timofeevich**  
chief scientist, doctor of technical  
sciences, Professor,  
299011, Sevastopol, Lenina St., 28  
e-mail: mvt3900@mail.ru

**Klimenko Alexander Gartazarovich**  
Institute of Nature and Technical  
Systems, Sevastopol  
chief engineer,  
299011, Sevastopol, Lenina St., 28  
e-mail: kag195877@gmail.com

Я.Н. ГАЙНУЛЛИНА, М.И. КАЛИНИН, П.К. СОПИН

## ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ГЛУБОКОВОДНЫХ СИСТЕМ ЖИДКОСТНОГО ДЫХАНИЯ В ЗАДАННЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

**Аннотация.** В работе рассмотрены особенности поведения гибких элементов глубоководных систем жидкостного дыхания, входящих в конструкцию аппаратов жидкостного дыхания замкнутого цикла. Изучены факторы, влияющие на определение величин критических нагрузок для гибких, упругих элементов системы.

**Ключевые слова:** эндотрахеальная трубка, гипербария, устойчивость, биообъекты, жидкостное дыхание.

### Введение

Разработка серии конструкций нормобарических и гипербарических аппаратов жидкостного дыхания замкнутого цикла, потребовала проведения развернутых исследований компонентов и элементов создаваемых систем, отвечающих самым разнообразным условиям эксплуатации, которые подвергались неоднократным изменениям в ходе работ над проектом. Так, например, менялись рабочие глубины, скорости погружения, всплытия, физико – механические и химические свойства дыхательных жидкостей, масса испытуемых объектов и т.д. В свою очередь это привело к решению задач многокритериальной оптимизации элементов и рандомизации параметров, влияющих на качество результатов экспериментов.

### Основная часть

Одним из определяющих факторов долговечности, надёжности и работоспособности элементов и систем глубоководных аппаратов жидкостного дыхания замкнутого цикла является устойчивость гибких элементов данных устройств [1]. В этом качестве можно рассматривать эндотрахеальную трубку для интубации, кабельные вставки, полимерные оболочки, мембраны, клапаны и т.д. Задача исследования устойчивости подобных изделий сводится к определению величины внешнего давления при котором круглая форма становится неустойчивой, что свидетельствует о том, что давление достигло критической величины [4]. Выше перечисленные изделия можно рассматривать как цилиндрические оболочки большой длины.

Рассмотрим элементарное кольцо, условно вырезанное из оболочки (рисунок 1).

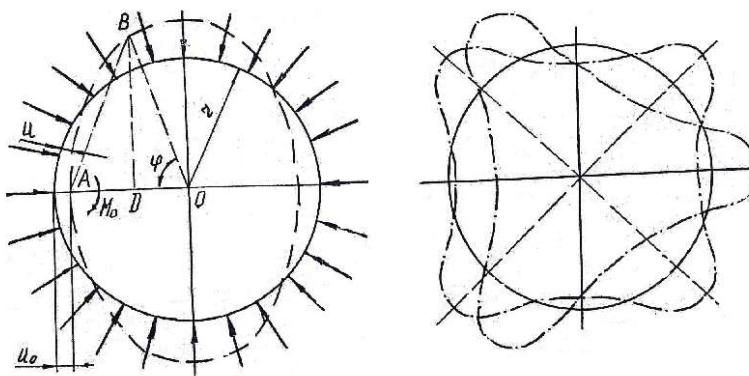


Рисунок 1 – Формы поперечного сечения гибких упругих элементов

Предположим, что под воздействием внешнего давления  $q$ , передаваемого на оболочку силовыми элементами конструкции, кольцо выпучивается и принимает эллиптическую форму, показанную на рисунке пунктиром, где  $r$  – радиус осевой линии кольца,  $u$  – радиальное перемещение  $i$  – той точки при выпучивании,  $u_0$  – радиальное смещение поперечного сечения А,  $M_0$  – изгибающий момент того же сечения А. Изгибающий момент в любом поперечном сечении В сплошного упругого кольца будет равняться:

$$M = M_0 + g\overline{AD} \cdot \overline{AD} - \frac{(\overline{AB})^2}{2} g, \quad (1)$$

из АОВ:

$$(\overline{OB})^2 = (\overline{AB})^2 + (\overline{OA})^2 - 2\overline{AO} \cdot \overline{AD},$$

$$\frac{1}{2}(\overline{AB})^2 - (\overline{AO})^2 \cdot (\overline{AD})^2 = \frac{1}{2}[(\overline{OB})^2 - (\overline{AO})^2] = \frac{1}{2}[(r - u)^2 - (r - u_0)^2].$$

Поскольку перемещение  $u$  является малой величиной, по сравнению с радиусом  $r$ , то слагаемыми, содержащими  $u^2$  или  $u_o^2$  можно пренебречь, вследствие чего запишем следующее:

$$\frac{1}{2}(\overline{AB})^2 - \overline{AO} \cdot \overline{AD} = r(u_o - u), \quad (2)$$

подставляя выражение (2) в формулу (1) можем записать:

$$M - M_o - gr(u_o - u). \quad (3)$$

Дифференциальное уравнение изгиба гибкого упругого элемента будет иметь вид:

$$\frac{d^2u}{d\varphi^2} + u = -\frac{r^2}{EJ} [M_o - dr(u_o - u)],$$

или

$$\frac{d^2u}{d\varphi^2} + u \left(1 + \frac{gr^3}{EJ}\right) = -\frac{M_o r^2 + gr^3 u_o}{EJ}, \quad (4)$$

решение данного выражения можем получить в виде:

$$u = C_1 \sin p\varphi + C_2 \cos p\varphi + \frac{M_o r^2 + gr^3 u_o}{EJ}, \quad (5)$$

где  $EJ$  – жёсткость элемента на изгиб,

$C_1, C_2$  – параметры постоянных величин, определяемые из граничных условий, а величина  $P$  – определяется по выражению:

$$P^2 = 1 + \frac{gr^3}{EJ} \quad (6)$$

Из условия обеспечения симметрии следует, что

$$\varphi(0) = \varphi\left(\frac{\pi}{2}\right) = 0. \quad (7)$$

По первому условию  $\varphi(0) = 0$ , получаем  $C_1 = 0$ , а по второму условию  $\varphi\left(\frac{\pi}{2}\right) = 0$ , получим

$$\sin p\frac{\pi}{2} = 0, \quad (8)$$

что удовлетворяется при равенствах:

$$P\frac{\pi}{2} = \pi; \quad P\frac{\pi}{2} = 2\pi; \quad P\frac{\pi}{2} = 3\pi,$$

и т.д. или в общем случае:

$$P\frac{\pi}{2} = n\pi, \quad (9)$$

откуда  $P = 2n$ .

Подставляя это значение в (6) получаем величину критического давления  $g_{кр}$  в следующем виде:

$$g_{кр} = \frac{(4n^2 - 1)EJ}{r^3}, \quad (10)$$

где параметр  $n$  характеризует форму потери устойчивости (первую, вторую и так далее). При первой форме ( $n = 1$ ) круглое скечение оболочки превращается в эллиптическое как показано на рисунке 1 пунктиром, а штрих пунктиром показано преобразование оболочки в «трёхлистник» и «четырёхлистник» соответственно. Поскольку вторая, третья и последующие формы потери устойчивости на практике являются маловероятными и дают более высокие значения для критических величин давления, то выбор этой величины  $q_{кр}$  должен быть выполнен при первой форме, а расчётное её значение в соответствии с [10] будет найдено как:

$$g_{кр} = \frac{3EJ}{r^3}. \quad (11)$$

Основным видом деформации цилиндрических гибких упругих оболочек при глубоководных экспериментах, помимо обжатия, является продольный изгиб [13,14,15].

Изучение его особенностей представляет большой практический интерес и является актуальной задачей [2]. Рассмотрим элементарное кольцо, вырезанное из эндотрахеальной силиконовой трубки диаметром  $13 \div 16$  мм сечениями, отстоящими друг от друга на единичном расстоянии. Момент инерции поперечного сечения этого кольца будет равен:

$$J = \frac{1h^3}{12}, \quad (12)$$

где  $h$  – толщина стенки эндотрахеальной трубки.

Поскольку поперечное сечение кольца не искажается при изгибе, то вместо модуля упругости можем поставить величину  $\frac{E}{1-\mu^2}$ , где  $\mu$  – коэффициент Пуассона материала трубки. Зависимость (11) для определения критического давления преобразуется к виду:

$$g_{кр} = \frac{Eh^3}{4(1-\mu^2)r^3}. \quad (13)$$

Это выражение справедливо до момента, когда давление в трубке меньше предела пропорциональности. Вне этого предела критическое давление будет меньше получаемого по формуле (12), а для его определения необходимо пользоваться выражением:

$$g_{кр} = \frac{h}{r} \cdot \frac{G_T}{1 + 4 \frac{G_T}{E} \frac{r^2}{h^2}}, \quad (14)$$

где  $G_T$  – предел текучести силикона при сжатии [1].

По мере уменьшения толщины стенки, критическое давление приближается к своему предельному значению  $\frac{Eh^3}{4r^3}$ , которое несколько меньше значения, получаемого по формуле (12), причём во всех случаях величины критического давления меньше  $\frac{hG_T}{r}$ , то есть меньше величины давления, соответствующей пределу текучести.

Для уверенного определения наличия или отсутствия устойчивости упругой цилиндрической оболочки эндотрахеальной трубки под действием комплекса эксплуатационных нагрузок, необходимо определить их критическую величину и сравнить её с реальными усилиями, возникающими на заданных глубинах погружения на рабочих режимах аппарата жидкостного дыхания. Для этого следует определить следующие величины:

$$g = \frac{T}{\rho} = \frac{\sin^2 \alpha T}{r_0}, \quad (15)$$

$$\bar{g} = \frac{gn}{2\pi r_0} = \frac{\sin^2 \alpha T}{2\pi r_0 r_0} = \frac{\sin \alpha}{2\pi r_0^2}, \quad (16)$$

$$g_0 \cdot 2\pi r = \bar{g} 2\pi r, \quad (17)$$

$$g_0 = \frac{\bar{g} r_0}{r} = \frac{\sin^2 \alpha T n}{2\pi r_0 r}, \quad (18)$$

где  $T$  – натяжение силовых элементов,  
 $r_0$  – средний радиус повива слоя,  
 $n$  – количество силовых элементов,  
 $\bar{g}$  – давление в слое силовых элементов,  
 $g_0$  – распределённое давление на оболочку.

Следовательно, теперь можно определить искомые величины в виде:

$$\frac{\sin^2 \alpha}{2\pi} \cdot \frac{T}{r r_0} n \leq g_{кр} = \frac{3Eh^3}{12(1-\mu^2)r^3}. \quad (19)$$

В действительности, при значительных изменениях нагрузок по величине, знаку и направлению – определение напряжений в упругих гибких трубчатых оболочках, связано с гораздо большими трудностями [8,9,12]. В момент потери устойчивости интубационной трубки существенно меняется кривизна её поверхности. Появляются попарно симметричные участки разных кривизн, напряжения на которых имеют различную величину. На участках с большей кривизной, увеличившейся под действием нагрузки, появляются силы, стремящиеся вернуть оболочку в первоначальное положение.

Для повышения эксплуатационных характеристик глубокоководных аппаратов жидкостного дыхания существенную роль играет надёжность, долговечность и устойчивость полимерных упругих оболочек, к которым относятся мембраны, клапаны, трубки сильфоны, специальные изделия и т.д. С целью повышения их качества на стадии изготовления, предполагается исследовать эксплуатационные характеристики гибких упругих элементов изготовленных из новых перспективных материалов, таких как: филлистран, хирулен, кевлар, флубон, протасул 1, СВМ – волокно, антегмит. Вышеперечисленные материалы обладают малой массой и высокими прочностными характеристиками [5,6].

Работоспособность (устойчивость) упругой гибкой цилиндрической оболочки под действием изгиба и внешнего распределённого давления, существенно зависит от геометрических несовершенств изделия при его изготовлении. Для численного определения влияния технологических несовершенств, предположим, что начальное отклонение трубки от идеально круглой формы, указанное на рисунке 2 пунктирной линией отвечает уравнению, записанному в виде:

$$u_1 = u_0 \cos 2\varphi, \quad (20)$$

где  $u_0$  – наибольшее начальное радиальное отклонение, которое предполагается малым по сравнению с радиусом  $r$ ,  
 $\varphi$  – центральный угол.

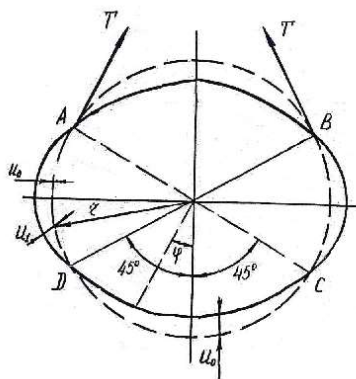


Рисунок 2 – Схема цилиндрической оболочки с начальным радиальным отклонением

Начальный вид кольцевого сечения трубки представлен на рисунке 2 сплошной линией. Если к такой эллиптической трубке приложено внешнее давление  $g$ , то будет иметь место дальнейшее сплющивание данного элемента. Обозначим радиальное перемещение, соответствующее дальнейшему сплющиванию трубки через  $u_0$  и рассмотрим изменение кривизны элементарного кольца единичной ширины. Дифференциальное уравнение изогнутой оси исследуемого элемента имеет следующий вид:

$$\frac{d^2 u}{ds^2} + \frac{u}{\rho^2} = -\frac{M}{EJ}, \quad (21)$$

где  $ds$  – длина элементарного отрезка криволинейного участка исследуемого элемента.  
 $\rho$  – радиус его кривизны.

Для варианта нашей расчётной схемы получим:

$$\frac{d^2 u_2}{d\varphi^2} + u_2 = -\frac{1}{D} M r^2, \quad (22)$$

где  $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$  – жёсткость на изгиб элементарного кольца.

Рассматривая изгибающий момент  $M$ , мы видим, что из-за давления  $g$  происходит уменьшение кривизны участков  $AB$  и  $CD$  элементарного кольца, следовательно, здесь момент  $M$  положительный, в то время как на остальных участках кольца момент отрицательный. В точках  $A, B, C, D$  изгибающий момент равен нулю, а взаимодействие между участками элементарного кольца представляется продольными силами  $T$ , касательными к пунктирному кругу, изображающему идеальную форму сечения кольца. Сжимающее усилие вдоль окружности кольца остаётся постоянным и будет равняться:

$$N = g \cdot r. \quad (23)$$

Изгибающий момент в любом поперечном сечении будет равен:

$$M = gr(u_2 + u_0 \cos 2\varphi). \quad (24)$$

В скобках записано выражение, соответствующее по величине полному радиальному отклонению от формы идеального кольца.

С учётом (23) уравнение (21) приобретает следующий вид:

$$\frac{d^2 u_2}{d\varphi^2} + u_2 = -\frac{1}{D} gr^3 (u_2 + u_0 \cos 2\varphi). \quad (25)$$

Преобразуем его в виде:

$$u_2'' + u_2 \left(1 + g \frac{r^3}{D}\right) = \frac{gr^3}{D} u_0 \cos 2\varphi. \quad (26)$$

Решение этого уравнения, удовлетворяющее условиям непрерывности в точках  $A, B, C$  и  $D$  будут выглядеть как:

$$u_2 = \frac{u_0 g}{g_{кр} - g} \cos 2\varphi. \quad (27)$$

В выражении (26) величина  $g_{кр}$  определяется по (12). Из (26) видно, что в точках  $A, B, C$  и  $D$  перемещение  $u_2$  и его вторая производная равны нулю, в связи с чем, изгибающие моменты в этих точках также обращаются в ноль, как и предполагалось ранее. Максимальная величина изгибающего момента будет достигаться при  $\varphi = 0$  и при этом будет равна:

$$M_{max} = gr \left( u_0 + \frac{u_0 g}{g_{кр} - g} \right) = \frac{gu_0 r}{1 - \frac{g}{g_{кр}}}. \quad (28)$$

Из выражения (27) видно, что при малых отношениях  $\frac{g}{g_{кр}}$  изменением эллиптичности вставки можно пренебречь и, что максимальный изгибающий момент получается умножением



сжимающего усилия  $T$  на начальное отклонение  $u_0$ . Если это отношение весьма существенно, то начальная эллиптичность эластичной эндотрахеальной трубки должна быть учтена в расчётах и при вычислении  $M_{\max}$  следует пользоваться формулой [7,11,16.17]. Максимальное сжимающее напряжение может быть получено как сумма максимального напряжения, вызванного изгибающим моментом  $M_{\max}$  и напряжения, возникающего от сжимающего усилия  $gr$ :

$$G_{\max} = \frac{gr}{h} + \frac{6gru_0}{h^2} \cdot \frac{1}{1 - \frac{g}{g_{\text{кр}}}}. \quad (29)$$

Опасной величиной давления будет  $g_t$ , то есть такая величина, при которой начинает проявляться текучесть материала. Подставляя  $G_t$  вместо  $G_{\max}$

$$G_t = \frac{g_{Tr}}{h} + \frac{6g_{Tr}u_0}{h^2} \cdot \frac{1}{1 - \frac{g}{g_{\text{кр}}}}. \quad (30)$$

Отсюда можно получить величину опасного давления  $g_t$ , если известна  $G_t$  для материала трубки и её начальное отклонение от геометрически совершенной формы  $u_0$ . Используя обозначения

$$\frac{r}{h} = m, \quad \frac{u_0}{r} = n, \quad (31)$$

получим уравнение для определения  $g_t$ , в следующем виде:

$$g_t = \left[ \frac{G_t}{m} + (1 + Gmn)g_{\text{кр}} \right] g_t + \frac{G + g_{\text{кр}}}{m} = 0. \quad (32)$$

Заметим, что давление  $g_t$ , определённое по формуле (31) меньше, чем давление, при котором наблюдается сплющивание трубки, следовательно, применяя  $g_t$  как крайнюю, критическую величину давления, мы будем находиться в пределах запаса прочности [18,19].

Давление, испытываемое упругой гибкой оболочкой, в наших условиях нагружения описывается выражением,

$$g = \frac{T_{in} \sin^2 \alpha}{2\pi r r_0}, \quad (33)$$

которое сравнивается с расчетной величиной  $g_{\text{кр}}$  по ранее приведенным зависимостям. Далее необходимо определить запас устойчивости элемента как:

$$n_{\text{уст}} = \frac{g_{\text{кр}}}{g}. \quad (34)$$

Для получения уточнённых данных искомых величин, воспользуемся записью кривизны линии поверхности  $\frac{1}{\rho}$ , обладающей главными кривизнами  $\frac{1}{\rho_1} \cdot \frac{1}{\rho_2}$  по Эйлеру:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_1} \sin^2 \alpha + \frac{1}{\rho_2} \cos^2 \alpha. \quad (35)$$

Далее записываем выражение для определения реального давления на эндотрахеальную трубку при выполнении глубоководных экспериментов по исследованию процессов жидкостного дыхания биологических объектов в виде:

$$g = \frac{T_{in}}{2\pi r_0} \left( \frac{\sin^2 \alpha}{2} + \frac{\cos^2 \alpha}{r} \right), \quad (36)$$

где  $r$  – технологический радиус,

$\alpha$  – угол перегиба элемента.

Упомянутый угол перегиба элемента определяется по формуле:

$$\text{tg} \alpha = \frac{2\pi r_0}{H}, \quad (37)$$

где  $H$  – величина технологического параметра, составляющего величину  $8 \div 10$  диаметров эндотрахеальной трубки (рисунок 3).

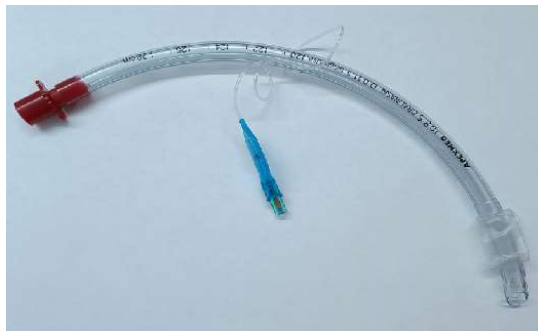


Рисунок 3 – Внешний вид эндотрахеальной трубки, используемой в глубоководных исследованиях жидкостного дыхания биологических объектов

### Заключение.

Расчёты устойчивости и определение величины критического давления, действующего на гибкие упругие полимерные оболочки в совокупности с учётом максимальных величин изгибающих моментов, позволяют выбрать оптимальные параметры элементов систем жидкостного дыхания с целью включения их в конструкцию аппарата замкнутого цикла для жизнеобеспечения биологических объектов при проведении глубоководных работ. Гибкие интубационные трубки, изготовленные с учётом полученных теоретических выражений применялись в реальной практике при проведении цикла глубоководных работ в Чёрном море на глубинах до 1500 м.

*Работа выполнена при поддержке Программы «Приоритет-2030» ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» (стратегический проект №2 "Прорывные исследования и разработки в области жидкостного дыхания").*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ржаницын А.Р. Расчёт упругих оболочек – М.: МИСК, 1977. – 483 с.
2. Пат. 188051 Российская Федерация, МПК А61М 16/04. Интубационная трубка / Пашков Е.В., Поливцев В. П., Калинин М. И., Мальков С.Ю.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Севастопольский государственный университет". – № RU 2018120556U1; заявл. 04.06.2018; опубл. 28.03.2019. Бюл. № 10.
3. Карпенко Г.В. Влияние активных жидких сред на выносливость стали – К.: АН УССР, 1955. – 208 с.
4. Ключников В.Д. Устойчивость упруго – пластических систем – М.: Наука, 1980. – 240 с.
5. Мяченков В.И. Расчёт составных оболочных конструкций / В.И. Мяченков, И.В. Григорьев – М.: Машиностроение, 1981. – 212 с.
6. Троицкий В.А. Оптимизация формы упругих тел / В.А. Троицкий, Л.В. Петухов – М.: Наука, 1982. – 432 с.
7. Амензаде Ю.А. Теория упругости – М.: Высшая школа, 1971. – 288 с.
8. Гузь А.Н. Трёхмерная теория стержней, пластин и оболочек / А.Н. Гузь, И.Ю. Бабич – К.: Высшая школа, 1980. – 167 с.
9. Орленко Л.П. Поведение материалов при интенсивных динамических нагрузках – М.: Машиностроение, 1964. – 168 с.
10. Партон В.З. Интегральные уравнения теории упругости / В.З. Партон, П.И. Перлин – М.: Машиностроение, 1977. – 311 с.
11. Ландау Л.Д. Механика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц – М.: Наука, 1965. – 204 с.
12. Беренов Д.И. Расчёты деталей на прочность – М.: Машгиз, 1989. – 216 с.
13. Кудрявцев И.В. Внутренние напряжения как резерв прочности в машиностроении – М.: Машгиз, 1951. – 278 с.
14. Нейбер Г.Л. Концентрация напряжений – ОГИЗ, 1947. – 204 с.
15. Катаев В.М. Справочник по пластическим массам в 2-х томах / В.М. Катаев, В.А. Попов, В.И. Сажин – М.: Химия, 1975. – 568 с.
16. Гайнуллина Я.Н., Пашков Е.В., Калинин М.И., Поливцев В.П. Исследование работоспособности элементов систем жизнеобеспечения биологических объектов в реализации технологий жидкостного дыхания // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2022. – № 1 (351). – С. 148-154.
17. Калинин М.И., Пашков Е.В., Сопин П.К., Гайнуллина Я.Н. Особенности проектирования и технология изготовления морской глубоинной капсулы // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева. – 2019. – № 4-1 (336) – С. 197 – 203.
18. Поливцев В.П., Поливцев В.В. Исследование технологии жидкостного дыхания методом погружения / всплытия биологического объекта в гидравлической камере с высоким давлением // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева. – 2021. – № 4 (348) – С. 183 – 190.
19. Поливцев В.П., Круговой А.Н., Калинин М.И., Поливцев В.В. Исследование технологии жидкостного дыхания для удаления азота из организма биообъекта посредством информационно-измерительной системы// Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева. – 2021. – № 6 (350) – С. 172 – 186.

**Гайнуллина Яна Николаевна**  
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,  
Научный сотрудник лаборатории «Экспериментальные системы жизнеобеспечения биологических объектов»  
г. Севастополь,  
ул. Гоголя, д. 14  
тел. +7(8692) 417741  
e-mail: medeya-ru@yandex.ru

**Калинин Михаил Иванович**  
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,  
кандидат технических наук,  
доцент, руководитель группы лабораторий «Экспериментальные системы жизнеобеспечения биологических объектов»  
г. Севастополь, ул. Гоголя, д. 14  
тел. +7(8692) 417741  
e-mail: kalininsev@mail.ru

**Сопин Павел Константинович**  
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,  
Старший научный сотрудник лаборатории «Экспериментальные системы жизнеобеспечения биологических объектов»  
г. Севастополь, ул. Гоголя, д. 14  
тел. +7(8692) 417741  
pavel.sopin@gmail.com

Ya.N. GAINULLINA, M.I. KALININ, P.K. SOPIN

## INVESTIGATION OF THE STABILITY OF ELEMENTS OF DEEP-SEA LIQUID RESPIRATION SYSTEMS UNDER SPECIFIED OPERATING CONDITIONS

**Abstract.** *The paper considers the features of the behavior of flexible elements of deep-sea liquid respiration systems included in the design of closed-loop liquid respiration devices. The factors influencing the determination of critical loads for flexible, elastic elements of the system have been studied.*

**Keywords:** *endotracheal tube, hyperborea, stability, biological objects, liquid respiration.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Rzhaitcin A.R. Raschet uprugikh – M.: MISK, 1977. – 483 s.
2. Pat. 188051 Rossiyskaya Federaciya, MPK A61M 16/04. Intubatsionnaya trubka / Peshkov E.V., Polivtsev V.P., Kalinin M.I., Mal'kov S.I.U.; zayavitel' i patentoobladatel' Faderal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie visshogo obrazovaniya "Sevastopol'skiy gasudarstvenniy universitet". – № RU 2018120556U1; zayavl. 04.06.2018; opubl. 28.03.2019. Biul. № 10.
3. Karpenko G.V. Vliyanie akrivnikh zhidkikh sred na dinoslivost' stali – K.: AN URSS, 1955. – 208 s.
4. Kliushnikov V.D. Ustoychivost' uprugo – plasticheskikh sistem – M.: Nauka, 1980. – 240 s.
5. Myachenkov V.I. Raschet sostavnikh obolochnikh konsryktsiy / V.I. Myachenkov, I.V. Grigor'ev – M.: Mashinostroenie, 1981. – 212 s.
6. Troitckiy V.A. Optimizatsiya formi yprugikh tel / V.A. Troitckiy, L.V. Petukhov – M.: Nauka, 1982. – 432 s.
7. Amenzade I.U.A. Teoriya uprugosti – M.: Visshaya shkola, 1971. – 288 s.
8. Guz' A.N. Trekhnernaya teoriya sterzhney, plastin i obolochek / A.N. Guz', I. I.U. Babich – K.: Visshaya shkola, 1980. – 167 s.
9. Orlenko L.P. Povedenie materialov pri intensivnikh dinamicheskikh nagryzkakh – M.: Mashinostroenie, 1964. – 168 s.
10. Patron V.Z. Integral'nie uravneniya teopii uprugosti / V.Z. Parton, P.I. Perlin – M.: – M.: Mashinostroenie, 1977. – 311 s.
11. Lahdau L.D. Makhanika / L.D. Landatc, E.M. Lifshiu – M.: Nauka, 1965. – 204 s.
12. Berenov D.I. Rascheti detaley na prochnost' – M.: Mashgiz, 1989. – 216 s.
13. Kudryavtsev I.V. Vnutrinnye napryazheniya kak rezerv prochnosti v mashinostroenii – M.: Mashgiz, 1951. – 278 s.
14. Neyber G.L. Kontcentratsiya napryazheniy – OGIZ, 1947. – 204 s.
15. Kataev V.M. Spravochnik po plasticheskim massam v 2-kh tomakh / V.M. Kataev, V.A. Popov, V.I. Sazhin – M.: Khimiya, 1975. – 568 s.
16. Gaynullina Ya.N., Pashkov E.V., Kalinin M.I., Polivtsev V.P. Issledovanie rabotosposobnosti elementov sistem zizneobespecheniya biologicheskikh ob'ektov v realizatsii thnologiy zidkostnogo dihaniya // Fyndamental'nie I prikladnie problem tehniki i tehnologii. – Orel: OGY im. I.S. Tyrgeneva. – 2022. – № 1 – S. 148 – 154.
17. Kalinin M.I., Pashkov E.V., Sopin P.K., Gaynullina Ya.N. Osobennosti proektirovaniya i tekhnologiya izgotovleniya morskoy glyinnoy kapsyli // Fyndamental'nie I prikladnie problem tehniki i tehnologii. – Orel: OGY im. I.S. Tyrgeneva. – 2019. – № 4-1 (336) – S. 197 – 203.
18. Polivtsev V.P., Polivtsev V.V. Issledovanie tekhnologii zidkostnogo dihaniya metodom pogryzhiya / vsplitiya biologicheskogo ob'ekta v gidravlicheskoj kamere s visokim davleniem // Fyndamental'nie I prikladnie problem tehniki i tehnologii. – Orel: OGY im. I.S. Tyrgeneva. – 2021. – № 4 (348) – S. 183 – 190.
19. Polivtsev V.P., Krygovoy A.N., Kalinin M.I., Polivtsev V.V. Issledovanie tekhnologii zidkostnogo dihaniya dlya ydaleniya azota iz organizma bioob'ekta posredstvom informatsionno-izmeritel'noy sisnemi // Fyndamental'nie I prikladnie problem tehniki i tehnologii. – Orel: OGY im. I.S. Tyrgeneva. – 2021. – № 6 (350) – S. 172 – 186.

**Gaynullina Yana Nikolaevna**  
Sevastopol State University,  
Researcher at the laboratory  
"Experimental life Support systems  
of biological objects", Sevastopol,  
Gogol str., 14  
tel. +7(8692) 417741  
e-mail: medeya-ru@yandex.ru

**Kalinin Mikhail Ivanovich**  
Sevastopol State University,  
Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor, Head of the  
laboratory group "Experimental life  
support systems for biological  
objects"  
Sevastopol, Gogol str., 14 tel.  
+7(8692) 417741  
e-mail: kalinin sv@mail.ru

**Sopin Pavel Konstantinovich**  
Sevastopol State University,  
Senior researcher of the laboratory  
"Experimental life support  
systems of biological objects"  
Sevastopol, Gogol str., 14  
tel. +7(8692) 417741  
pavel.sopin@gmail.com

© Я.Н. Гайнуллина, М.И. Калинин, П.К. Сопин, 2024

А.В. АБРАМОВ, Е.Я. СУРЖЕНКО, В.В. КУРГУЗОВ, М.В. РОДИЧЕВА

## ЦИФРОВОЙ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ДВОЙНИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

**Аннотация:** Рассмотрен процесс отработки конструкции экспериментальной установки для исследования пылепроницаемости материалов одежды шахтера на основе концепции цифровых двойников. Проведён анализ условий труда в шахте, выявлены основные процессы, оказывающие негативное влияние на здоровье работника: диффузия угольной пыли через слои комплекта одежды в пододежное пространство. Составлен цифровой двойник экспериментальной установки, а на его основе – функциональный двойник процессов распространения пыли в ее рабочем объеме, получен комплекс численных решений в виде динамики полей скорости воздуха и концентрации пыли в рабочем объеме.

По результатам численного моделирования проведено уточнение компоновки установки, определен предпочтительный вариант размещения источника пыли. Также получены численные данные по размерам и взаимному расположению ее отдельных элементов: высота зоны подачи пыли, расстояния от вентилятора до источника и от источника до образца.

**Ключевые слова:** пылепроницаемость материалов одежды шахтера, цифровой двойник, функциональный двойник, концентрация, скорость воздуха, диффузия.

### Введение

Использование цифрового и функционального двойников позволяет достаточно полно отработать конструкцию объекта-оригинала в процессе проектирования [1, 2]. На первом этапе выстраивают цифровой двойник проектируемого объекта. На его основе получают функциональный двойник, с помощью которого исследуют поведение объекта при различных сценариях [3]. По результатам расчетов в цифровой двойник вносят необходимые изменения. Многократная реализация этого алгоритма позволяет провести достаточно полную виртуальную отработку объекта-оригинала [4].

Рассмотрим порядок использования этого подхода на примере экспериментальной установки для исследования пылепроницаемости материалов защитной одежды шахтера.

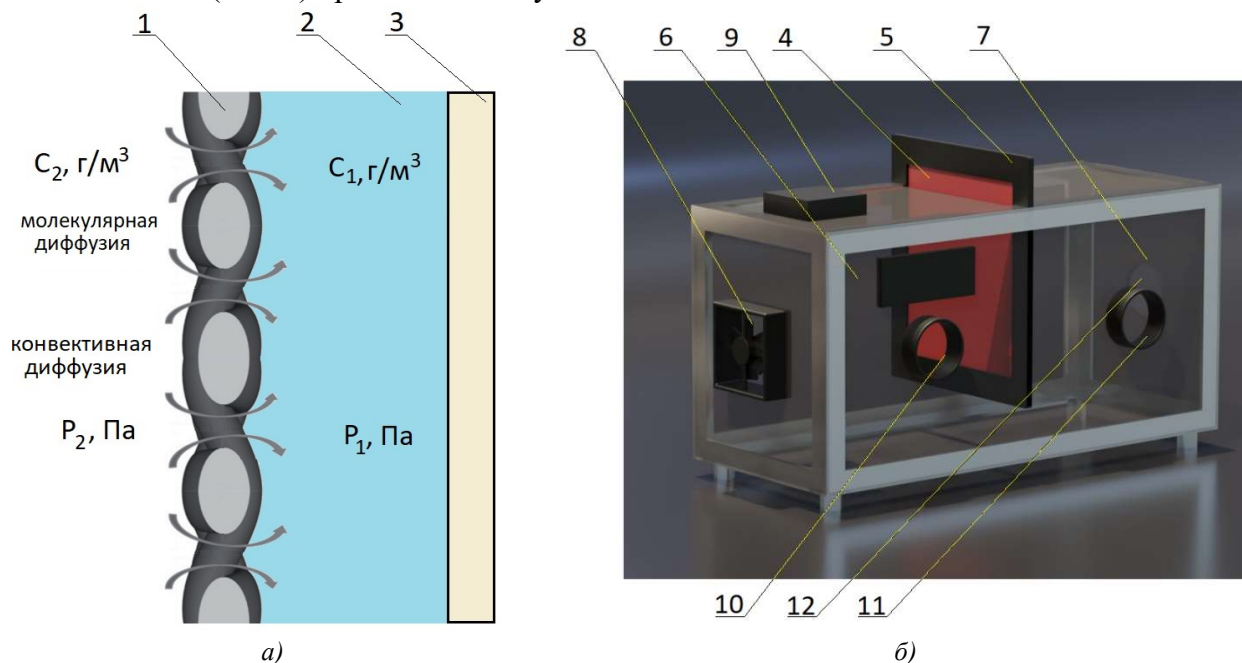
Основным негативным фактором условий труда в шахте является высокая концентрация угольной пыли ( $C_1 = 0,01 - 1,4$  моль/м<sup>3</sup>, в зависимости от вида совершаемых работ) [5]. Для обеспечения безопасности работника необходимо поддерживать концентрацию угольной пыли под одеждой на уровне, близком к нулю ( $C_2 = 0$  моль/м<sup>3</sup>). Угольная пыль проникает под одежду двумя путями – через пакет материалов; через граничные участки конструкции: открытые или плохо защищенные участки горловины, низа рукавов, застежку и т.п. Минимизации потока пыли к телу обеспечивается за счет целенаправленного подбора пакета материалов и применения соответствующих назначению одежды функциональных конструктивно-технологических решений ее элементов и узлов. Для оценки эффективности конструкции одежды проводят натурные испытания и опытную носку прототипов комплектов одежды. Как показывает анализ литературных источников, методы исследования пылепроницаемости материалов, в том числе, стандартный, не всегда решают эту задачу с требуемой точностью [6]. Применение цифрового и функционального двойников при проектировании позволит лучше отработать конструкцию экспериментальной установки для оценки пылепроницаемости материалов одежды шахтера и устранить выявленные недостатки.

### Цифровой двойник экспериментальной установки для оценки пылепроницаемости материалов одежды шахтера

Пыль мигрирует в текстильном материале, в основном, через поля просвета молекулярной и конвективной диффузией. Молекулярная диффузия протекает под действием разности концентрации пыли в окружающей среде и пододежном пространстве ( $\Delta C = C_2 - C_1$ ). Для обеспечения технологических режимов добычи каменного угля закрытым способом и обеспечения безопасности работника, штольни оснащаются системой вентиляции. В этих условиях пыль может проникать в структуру материала конвективной диффузией, вместе с

потоками воздуха, под действием разности давлений воздуха по обе стороны пакета одежды ( $\Delta P = P_2 - P_1$ ).

Как показывает анализ условий труда шахтеров, температурный режим в рабочей зоне соответствует комфортным условиям, а в ряде случаев – условиям повышенных температур. Комплект одежды шахтера представлен бельевым изделием и защитным костюмом, которые на отдельных участках разделены воздушной прослойкой. Схема процесса прохождения пыли через верхний слой (поз. 1, рисунок 2, а) в пододежное пространство, отделяющее костюм от бельевого слоя (поз. 2) принимает следующий вид:



**Рисунок 1 – Схема (а) и цифровой двойник (б) экспериментальной установки для оценки пылепроницаемости материалов одежды шахтера**

На ее основе построен цифровой двойник экспериментальной установки для оценки пылепроницаемости материалов одежды шахтера (рисунок 2, б). Принцип его работы основан на том, что исследуемый образец (поз. 4), закрепленный в рамке (поз. 5) разделяет камеру на запыленную (поз. 6) и чистую (поз. 7) зоны. В запылённой зоне создаются повышенное давление воздуха и концентрация пыли таким образом, чтобы величины  $\Delta C$  и  $\Delta P$  соответствовали реально наблюдаемым значениям.

Для этого в боковом торце установки на цифровом двойнике предусмотрен вентилятор (поз. 8). Пыль подается в установку из источника (поз. 9), который может быть размещен в ее нижней или верхней части. Для контроля концентрации пыли в обеих камерах предполагается выполнить отверстия (поз. 10, 11) для размещения соответствующих измерительных инструментов. В противоположном от вентилятора торце установки будет выполнено отверстие для свободного выхода воздуха (поз. 12).

### **Функциональный двойник процессов диффузии пыли в экспериментальной установке для оценки пылепроницаемости материалов одежды шахтера**

Процессы пылепроницаемости текстильных материалов одежды шахтера в условиях конвективной и молекулярной диффузии чрезвычайно сложны. Двигаясь через структуру материала вместе с воздухом, пылевые частицы могут захватываться текстильными волокнами при касании, за счет сил инерции, механизмов электростатического осаждения, термофореза, гравитационного осаждения, ситового эффекта. Интенсивность этих процессов определяется, в том числе, структурой и свойствами текстильного материала, сквозь который движется запыленный воздух.

Специальная одежда шахтеров может производиться из хлопчатобумажных, полульняных или смесовых тканей поверхностной плотностью не менее 250 г/м², выработанных полотняным, саржевым, сатиновыми, реже атласным переплетениями. Такие

структуры имеют достаточно сложное пространственное строение, которое оказывает существенное влияние на форму воздушных струй в структуре материала. Наряду с необходимостью параллельного расчета обозначенного набора физических процессов, это обстоятельство существенно усложняет процесс математического моделирования пылепроницаемости текстильных материалов одежды шахтера.

Известно, что особенностью цифрового и функционального двойников заключается в том, что они не отбрасываются после материального воплощения проектируемого объекта, как это обычно происходит с традиционными численными моделями. Напротив – они развиваются параллельно с физическим объектом, усложняется и аккумулируют накопленный в результате экспериментальных исследований опыт на протяжении всего жизненного цикла объекта – оригинала [7]. Таким образом при проектировании функционального двойника нет необходимости в одномоментном воспроизведении всех интересующих процессов. На первом производится виртуальная отработка размеров и режимов работы установки. После ее материального воплощения, на втором этапе осуществляется точное моделирование анализируемых физических процессов с учетом накопленного экспериментального материала.

Таким образом на данном этапе исследований авторы не ставили перед собой задачу точного моделирования сложных процессов пылепроницаемости тканей одежды шахтера. Основная цель заключалась в отработке конструктивных параметров и режимов работы экспериментальной установки, что позволило рассматривать материал одежды шахтера в упрощенном виде.

Геометрической моделью функционального двойника является воздушный объем для удобства представленным в плоскостных координатах.

Модель материала одежды шахтера получена в рамках подхода М. Kyosow, согласно которому, в нормальных условиях, воздушный поток проходит только через поля просвета ткани, а нити являются для него непреодолимым препятствием [8]. Следуя этому подходу, плоскостные модели полей просвета ткани можно получить в сечениях ткани по системам нитей основы и утка (рисунок 2, а).

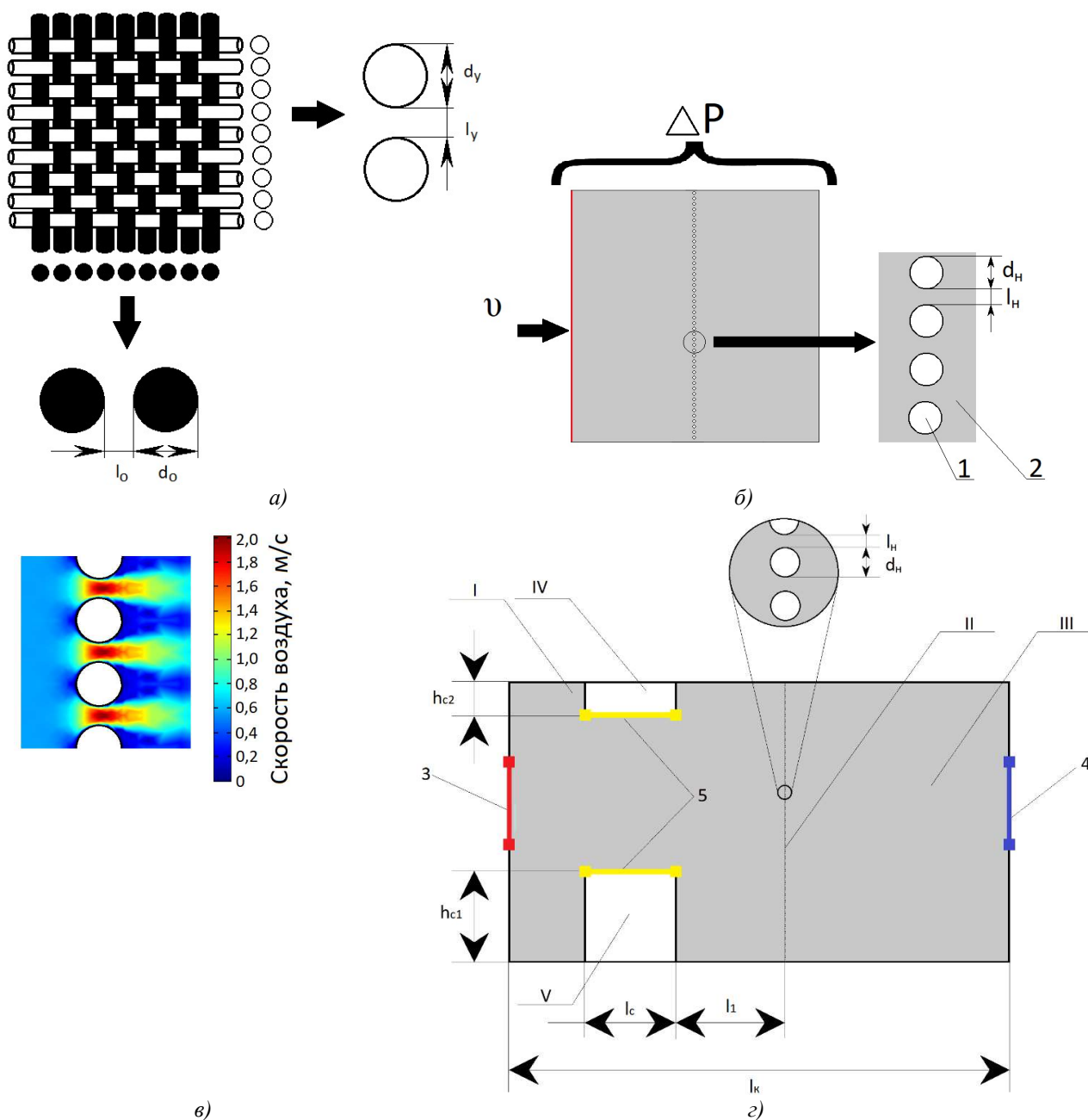
Анализ структурных характеристик текстильных материалов для одежды шахтера позволил установить диапазоны значений диаметров нитей ( $d_n$ ): от 0,25 мм до 0,4 мм и расстояний между ними ( $l_n$ ): от 0,15 мм до 0,3 мм. Будем считать, что диаметры нитей основы и утка одинаковы и равны среднему значению из этого диапазона ( $d_n = 0,35$  мм), а расстояние между нитями основы и утка составляет  $l_n = 0,2$  мм. Тогда поперечные сечения ткани примут вид ряда круглых сечений уточных нитей, как показано на рисунке 2, б. Модель полей просвета ткани получена путем геометрического вычитания кругов (поз. 1) из воздушного пространства (поз. 2).

Последующее решение уравнения движения воздуха в условиях разности давлений по обе стороны образца ( $\Delta P$ ) позволяет достаточно точно моделировать процессы проницаемости материала запылённым воздухом (рисунок 2, в).

Таким образом, цифровой двойник экспериментальной установки для оценки пылепроницаемости материалов одежды шахтера принимает вид, приведенный на рисунке 2, г. Через участок (поз. 3) в установку поступает воздух со скоростью  $v$ , (0,2 – 1,0 м/с, в соответствии с наблюдаемой в шахте), а выходит через противоположную границу (поз. 4). В зависимости от варианта двойника источник пыли располагается в ее верхней (поз. IV), или нижней (поз. V) части на высоте  $h_{c1}$  ( $h_{c2}$ ) и расстоянии  $l_1$  от образца. Поток пыли с интенсивностью  $J$  (г/(м<sup>2</sup>·с)) рассеивается в воздух камеры с границы – поз. 5.

С его помощью были решены следующие задачи: обоснован вариант размещения источника пыли; подобрана высота границы подачи пыли (поз. 5, рисунок 2); обосновано оптимальное расстояние  $l_1$  по критерию равномерности концентрации пыли в запыленной зоне.

Исследуемый образец материала одежды шахтера представлен набором круглых сечений уточных нитей, равномерно заполняющих область II рабочего объема экспериментальной установки по высоте (рисунок 2, г).



**Рисунок 2 – Моделирование процессов проницаемости образца текстильного материала:**  
(а – проекционная модель текстильного материала; б – модель полей просвета ткани для прохождения запыленного воздуха; в – скорость воздуха в полях просвета ткани; г – геометрическая модель цифрового двойника установки для оценки пылепроницаемости текстильных материалов)

Особенностью моделируемого процесса является высокая плотность пыли в сравнении с плотностью воздуха, что делает невозможным использование классической формы системы уравнений Навье-Стокса для проведения расчетов.

Учитывая эти особенности, В. Wenga-Ntcheping с соавторами предложено уравнение движения на основе модели к-ε турбулентности [9]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho k}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho k u}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \\ \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho \varepsilon u}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_b) - G_{3\varepsilon} G_b - G_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \end{cases} \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха в камере, кг/м<sup>3</sup>;  
 $k$  – тепло, возникающее в воздухе при трении струй, Дж;  
 $u$  – скорость движения воздуха в точке, м/с;



$\mu$  – кинематическая вязкость воздуха,  $(\text{м}^2/\text{с}) \cdot 10^{-6}$ ;

$Y_M$  – коэффициент турбулизации воздуха;

$C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$ ,  $C_{3\varepsilon}$  – эмпирические коэффициенты,

$\varepsilon$  – пульсационная составляющая потока в условиях турбулентности;

$\sigma_k$  – турбулентное число Прандтля.

Для описания динамики поля концентрации пыли в условиях молярной и молекулярной диффузии использовано уравнение (2) [10]:

$$\frac{\partial c_i}{\partial \tau} + \nabla(D_i \nabla c_i) + u_v \nabla c_i = R_i \quad (2)$$

где  $c_i$  – концентрация пыли в воздухе, моль/кг;

$u_v$  – скорость движения воздуха, м/с;

$D_i$  – коэффициент диффузии пыли в воздух,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$R_i$  – интенсивность поступления (образования) пыли в камеру, моль/ $(\text{м}^3 \cdot \text{с})$ .

Перемещение пыли в горизонтальном направлении обусловлено ее вовлечением в воздушный поток, а в вертикальном – гравитационным осаждением. Скорость гравитационного осаждения ( $v_{oc}$ , м/с) пылевых частиц вычисляется по закону Стокса:

$$v_{oc} = \frac{d^2 \Delta \rho v_B^2}{18 \eta} \quad (3)$$

где  $d$  – диаметр частицы рассматриваемой фракции пыли, мм;

$\Delta \rho$  – разность плотностей пыли и воздуха,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$\eta$  – динамическая вязкость смеси «воздух – пыль»,  $(\text{Н} \cdot \text{с})/\text{м}^2$ .

Современные экспериментальные методы позволяют достаточно точно определить плотность частиц пыли каменного угля. В частности, работами С.Б. Романченко установлено, что ее величина зависит от фракционного состава пыли (распределения относительного количества частиц по диаметру), который, в свою очередь, определяется происхождением каменного угля [11]. Например, для Ворогошорского месторождения эти свойства приведены в таблице 1 [12].

Коэффициент диффузии пыли вычислялся отдельно по горизонтальному и вертикальному направлениям по величинам скорости потока воздуха и витания частиц пыли с учетом времени. При решении численной модели использовался итерационный решатель, позволивший определить динамику скорости воздуха и концентрации пыли в рабочем объеме установки во времени при различных геометрических параметрах и вариантах расположения источника (рисунок 3).

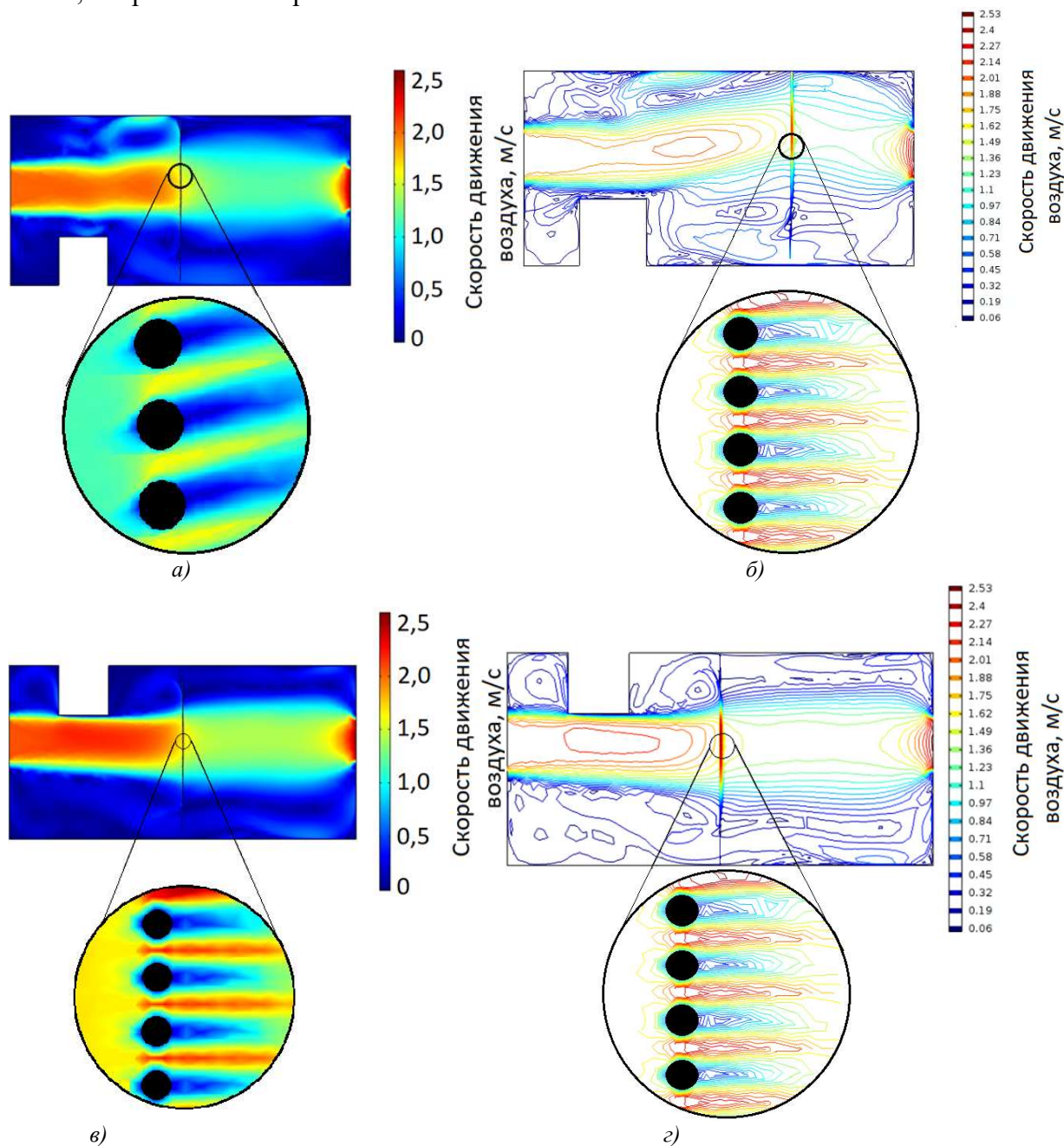
Таблица 1 - Свойства пыли каменного угля Ворогошорского месторождения

Дисперсность (фракционный состав, мкм)	0 - 45	46 - 63	64 - 94	95 - 125	125 - 140	141-200
Выход фракции, %	3,78	18,56	32,77	14,58	9,74	20,55
Объемная плотность фракции, $\text{г}/\text{см}^3$	0,42	0,43 – 0,55	0,56 – 0,62	0,63 – 0,67	0,68 – 0,7	0,71 – 0,8

### Результаты численного моделирования на функциональном двойнике экспериментальной установки для оценки пылепроницаемости материалов одежды шахтера

Согласно полученным решениям, воздушная струя, подаваемая в пылевую камеру вентилятором, является устойчивой, несмотря на учет в расчётах турбулентной составляющей воздушного потока. В результате, расход воздуха в центральных частях образца и, следовательно, пылевая нагрузка будут выше, чем на его краях.

Устойчивая воздушная струя способствует формированию неравномерного поля концентрации пыли в объеме экспериментальной установки (рисунок 4). Для более полного рассеивания пыли в цифровом двойнике экспериментальной установки введен дополнительный вентилятор (поз. 2, рисунок 5), который генерирует вторичный воздушный поток, направленный вертикально.



**Рисунок 3 – Поле скорости воздуха в объеме экспериментальной установки при различных вариантах размещения источника пыли:**

*а – поле скорости при подаче из нижней части камеры; б – изотакси при подаче пыли через нижнюю часть камеры; в – поле скорости при подаче из нижней части камеры; г – изотакси при подаче пыли через верхнюю часть камеры*

На рисунке приведено распределение поля скоростей в камере при скорости воздуха в дополнительном потоке в 4 раза ниже основного. Как видно, в этом случае горизонтальная воздушная струя не рассеивается, но пыль достаточно равномерно распределяется по запыленной зоне экспериментальной установки (рисунок 6).

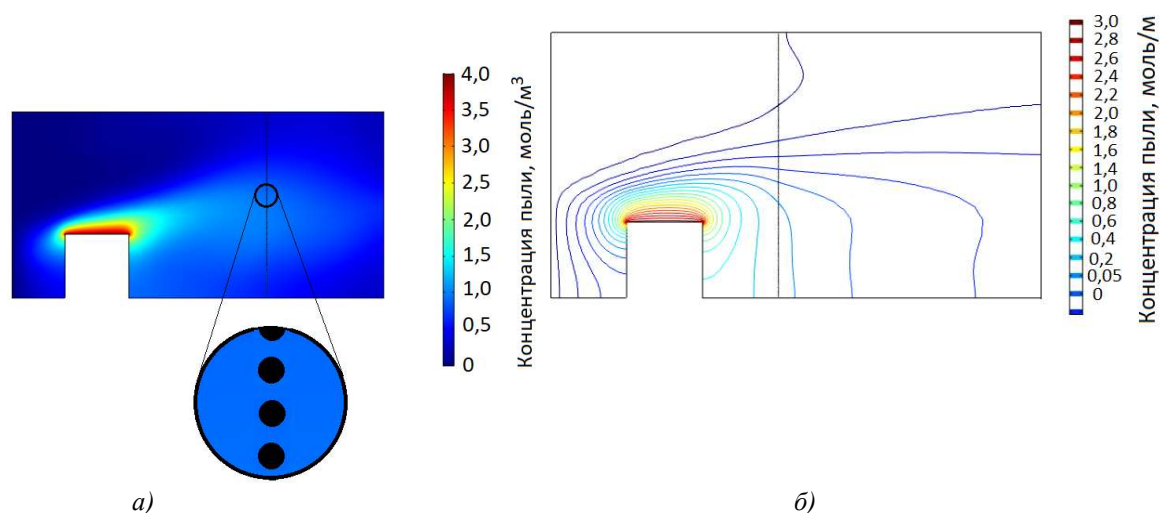


Рисунок 4 - Поле концентраций (а) и изоконцентрационные линии (б) пыли в камере при подаче пыли в нижней части экспериментальной установки

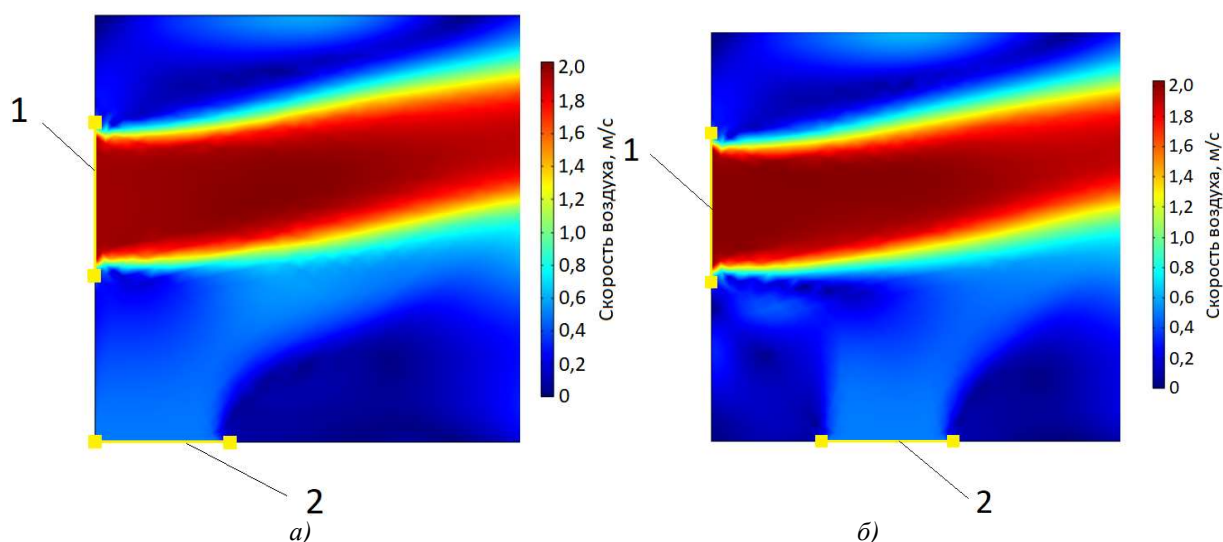


Рисунок 5 – Поле скорости воздуха в экспериментальной установке при подаче вторичного потока:  
а – при размещении вторичного вентилятора около левого торца;  
б – размещении вторичного вентилятора на расстоянии 0,1 м от левого торца)

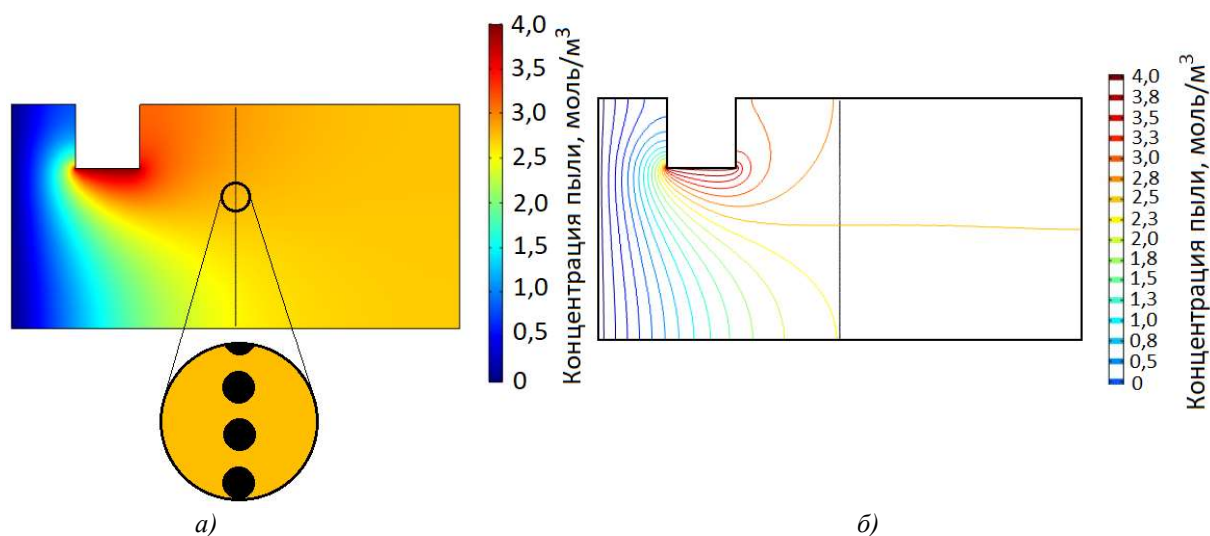


Рисунок 6 – Поле концентраций (а) и изоконцентрационные линии (б) пыли в камере при подаче пыли в верхней части камеры и ее рассеивании дополнительным воздушным потоком

Количественные значения концентрации в каждой точке поля получены при плотности потока пыли от источника  $J = 32 \text{ г/(м}^2\cdot\text{с)}$ , что обеспечивает требуемую концентрацию ( $C_1 = 0,2 - 17 \text{ г/м}^3$  ( $0,01 - 1,4 \text{ моль/м}^3$ )) в зоне испытания.

### Выводы

Численные расчеты динамики полей скорости воздуха и концентрации пыли позволили обосновать положение источника пыли, расположение и параметры работы основного и дополнительного вентиляторов. В частности:

- исследуемый образец, необходимо располагать в экспериментальной установке таким образом, чтобы он разделил ее рабочий объем на две равные по размерам камеры – запыленную и чистую.

- источник пыли с размером плоскости подачи пыли  $0,1 \times 0,1 \text{ м}$  рекомендовано располагать в верхней части установки на высоте, равной высоте верхнего торца основного вентилятора.

- дополнительный вентилятор для более полного рассеивания пыли по камере рекомендовано расположить в нижней части установки на расстоянии  $0,1 \text{ м}$  от ее левого торца.

- плотность пылевого потока от источника, для поддержания требуемой концентрации пыли в запыленной камере составляет  $J = 32 \text{ г/(м}^2\cdot\text{с)}$ .

Рекомендации к конструкции и режимам работы экспериментальной установки были составлены исходя из условий, наблюдаемых на рабочем месте шахтера, с учетом структурных особенностей материалов специальной одежды шахтера. При исследовании пылепроницаемости текстильных материалов для одежды других видов, конструкцию экспериментальной установки и режимы проведения эксперимента необходимо корректировать исходя из наблюдаемых условий и особенностей применяемых текстильных материалов.

В настоящий момент экспериментальная установка для оценки пылепроницаемости материалов одежды шахтера находится на стадии изготовления. После ее запуска и накопления начального объема экспериментальных данных планируется дальнейшее развитие функционального двойника. В частности, будет обеспечено постепенное усложнение геометрической модели текстильного материала, что сделает возможным расчет процессов пылепроницаемости тканей различных переплетений и структурных характеристик. Также планируется воспроизведение в функциональном двойнике отдельных пылевых частиц различных фракций. Это позволит не только определять интенсивность накопления пыли в структуре образца, но и моделировать изменение сечения полей просвета ткани по мере накопления пылевых частиц на поверхности нитей.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Glaessgen, E., Stargel, D. The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles // 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics and materials conference. Honolulu, Hawaii, 2012. – 14 p. doi: <https://doi.org/10.2514/6.2012-1818>
2. Gülbahar E., Achten I. H. Architectural hybrid (physical-digital) prototyping in design processes with digital twin technologies // Architecture and Planning Journal (APJ). – 2023 – pp. 43-60. doi: 10.54729/2789-8547.1199
3. Liu Z. A framework for an indoor safety management system based on digital twin / Z. Liu, A. Zhang, W. Wang // Sensors, No 20. Vol. 20 – 2020. – pp. 5771-5791. doi: <https://doi.org/10.3390/s20205771>
4. Rios J. Product avatar as digital counterpart of a physical individual product: literature review and implications in an aircraft / J. Rios, J. C. Hernandez, M. Oliva, F. Mas // Transdisciplinary Engineering, Transdisciplinary Lifecycle Analysis of Systems. – No 2. – 2015. – pp. 657-666. doi: <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-544-9-657>
5. Коротков С. Е. Влияние угольной пыли на здоровье работников горной промышленности Кузбасса // Инновационные технологии в машиностроении: сборник трудов VII Международной научно-практической конференции, 2016 г., Юрга. — Томск: ТПУ. – 2016. – С. 426-428.
6. Пат. 12861 МПК G01 N 15/08 Устройство для определения пылеемкости текстильных материалов / Метелева О.В., Цапалов Б.М. и др.; заявитель и патентообладатель: ФГБОУ ВО «Ивановская государственная текстильная академия». Заявл. 12.07.1999. Оpubл. 10.02.2000 Бюл. № 4. – 6 с.
7. Прохоров А., Лысачев М. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. / под ред. проф. Боровкова А. // М.: ООО «АльянсПринт», 2020. – 401 с.

8. Kyosov M., Angelova R.A., Stankov P. Numerical modeling of the air permeability of two-layer woven structure ensembles // Textile Research Journal. – 2015. – Vol. 6(19). – pp. 2067–2079. – doi:10.1177/0040517515619358.
9. Wenga-Ntcheping B. Numerical Study and Simulation in COMSOL Multiphysics of the Dilution Process during Dust Sampling in Dry Machining [Эл. ресурс] / B.Wenga-Ntcheping, A. Djebara, R. Kamguem, J. Kouam // режим доступа: <https://www.comsol.com/paper/numerical-study-and-simulation-in-comsol-multiphysics-of-the-dilution-process-du-13157>. дата обращения: 19.01.2024
10. Comsol Multiphysics Chemical Reaction Engineering Module User's Guide [Эл. ресурс]// режим доступа: <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.chem/ChemicalReactionEngineeringModuleUsersGuide.pdf> // дата обращения: 19.01.2024.
11. Проблемы определения фактической плотности угольных частиц в процессах витания и седиментации / С.Б. Романченко, А.А. Трубицын, С.С. Кубрин // Вестник – 2020. – №1. – с. 6 - 14.
12. Дисперсность каменноугольной пыли марки «Ж» Воргашорского месторождения и ее влияния на процесс термической деструкции / В.А. Родионов, Л.В. Пихконен, С.Я. Жихарев // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2017. – №4. – с. 350-356

**Абрамов Антон Вячеславович**

ФГБОУ ВО «Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)», г. Москва.

Доктор технических наук, профессор кафедры материаловедения и товарной экспертизы 119071, г. Москва, ул. Малая Калужская, 1

Тел. 8(961) 627-88-88

E-mail: Ant-lin88@mail.ru

**Сурженко Евгений Яковлевич**

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», г. Санкт-Петербург

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструирования и технологии швейных изделий.

191186, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 18

Тел. +7 (812) 310-39-11

E-mail: esurzh@mail.ru

**Кургузов Владимир Владимирович**

ФГБОУ ВО «Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)», г. Москва,

Аспирант кафедры материаловедения и товарной экспертизы 119071, г. Москва, ул. Малая Калужская, 1

Тел. 8(901) 771-86-64

E-mail: forbeemo@gmail.com

**Родичева Маргарита Всеволодовна**

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева».

Кандидат технических наук, зав. кафедрой индустрии моды

302026, г.Орел, ул. Комсомольская, 95

Тел. 8(920) 287-93-32

E-mail: rodicheva.unpk@gmail.com

A.V. ABRAMOV, E.Ya. SURZHENKO, V.V. KURGUZOV, M.V. RODICHEVA

## DIGITAL AND FUNCTIONAL TWINS OF AN EXPERIMENTAL INSTALLATION FOR ASSESSING THE DUST PERMEABILITY OF MINER'S CLOTHING MATERIALS

**Abstract:** *The process of developing the design of an experimental installation for studying the dust permeability of miner's clothing materials based on the concept of digital twins is considered. An analysis of working conditions in the mine was carried out, and the main processes that had a negative impact on worker health were identified: the diffusion of coal dust through the layers of a set of clothing into the space under clothing. A digital twin of the experimental setup was compiled, and on its basis a functional twin of the processes of dust propagation in its working volume was compiled, and a set of numerical solutions was obtained in the form of the dynamics of air velocity fields and dust concentration in the working volume.*

*Based on the results of numerical modeling, the installation layout was refined and the preferred option for placing the dust source was determined. Numerical data were also obtained on the sizes and relative positions of its individual elements: the height of the dust supply zone, the distance from the fan to the source and from the source to the sample.*

**Keywords:** *dust permeability of miner's clothing materials, digital twin, functional twin, concentration, air speed, diffusion.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Glaessgen, E., Stargel, D. The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles // 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics and materials conference. Honolulu, Hawaii, 2012. – 14 p. doi: <https://doi.org/10.2514/6.2012-1818>

2. Gülbahar E., Achten I. H. Architectural hybrid (physical-digital) prototyping in design processes with digital twin technologies // *Architecture and Planning Journal (APJ)*. – 2023 – pp. 43-60. doi: 10.54729/2789-8547.1199
3. Liu Z. A framework for an indoor safety management system based on digital twin / Z. Liu, A. Zhang, W. Wang // *Sensors*, No 20. Vol. 20 – 2020. – pp. 5771-5791. doi: <https://doi.org/10.3390/s20205771>
4. Rios J. Product avatar as digital counterpart of a physical individual product: literature review and implications in an aircraft / J. Rios, J. C. Hernandez, M. Oliva, F. Mas // *Transdisciplinary Engineering, Transdisciplinary Lifecycle Analysis of Systems*. – No 2. – 2015. – pp. 657-666. doi: <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-544-9-657>
5. Korotkov S.E. Vliyaniye ugol'noy pyli na zdorovie rabotnikov gornoy promyshlennosti Kuzbassa // *Innovatsionnye tehnologii v nmashinostroenii: sbornik trudov VII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*, 2016 г., Jugra. – Tomsk: TPU. – 2016. – S. 426-428.
6. Pat. 12861 Rossiyskaya federatsiya MPK G01 N 15/08 Ustroustvo dlya opredeleniya pylejnosty trekstilnykh materialov / Meteleva O.V., Tsapalov B.M. I dr.; zayavitel I patntoobladatel': FGBOU VO «Ivanovskaya gosudarestvennaya tekstilnaya akademiya». Zayavl. 12.07.1999. Opubl. 10.02.2000 Bul. № 4.
7. Prohorov A., Lysachev M. Tsifrovoy dvoynik. Analiz, trendy, mirovoy opyt / pod. Red. Prof. Borovkova A. // M:OOO «Alyans Print», 2020. – 401 s.
8. Kyosov M., Angelova R.A., Stankov P. Numerical modeling of the air permeability of two-layer woven structure ensembles // *Textile Research Journal*. – 2015. – Vol. 6(19). – pp. 2067–2079. – doi:10.1177/0040517515619358.
8. Wenga-Ntcheping B. Numerical Study and Simulation in COMSOL Multiphysics of the Dilution Process during Dust Sampling in Dry Machining [Эл. ресурс] / B.Wenga-Ntcheping, A. Djebara, R. Kamguem, J. Kouam // режим доступа: <https://www.comsol.com/paper/numerical-study-and-simulation-in-comsol-multiphysics-of-the-dilution-process-du-13157>. дата обращения: 19.01.2024
9. Comsol Multiphysics Chemical Reaction Engineering Module User's Guide [Эл. ресурс] // режим доступа: <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.chem/ChemicalReactionEngineeringModuleUsersGuide.pdf> // дата обращения: 19.01.2024.
10. Problemy opredeleniya fakticheskoy plotnosti ugol'nykh chasits v protsessah vitania i sedmintatsii / S.B. Romanchenko, A.A. Trubitsin, S.S. Kubrin // *Vesnik* – 2020. – №1. – s. 6 - 14.
11. Dispersnost' kamennougolnoy pyli marki «J» vorgashskogo mestorojdeniya I ee vliyaniye na process termicheskoy destruktivnoy / V.A. Rodionov, L.V. Pihkonen, S.Ya. Zhikharev // *Vesnik PNIPU. Geologia. Neftegazovoe I gornoye delo* – 2017. - №4. – s. 350 – 356

**Abramov Anton Vyacheslavovich**

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Russian State University named after A.N. Kosygina (Technology. Design. Art)", Moscow.  
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Materials Science and Commodity Expertise  
119071, Moscow, st. Malaya Kaluzhskaya, 1  
Tel. 8(961) 627-88-88  
E-mail: Ant-lin88@mail.ru

**Kurguzov Vladimir Vladimirovich**

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Russian State University named after A.N. Kosygina (Technology. Design. Art)", Moscow,  
Postgraduate student of the Department of Materials Science and Commodity Expertise  
119071, Moscow, st. Malaya Kaluzhskaya, 1  
Tel. 8(901) 771-86-64  
E-mail: forbeemo@gmail.com

**Surzhenko Evgeniy Yakovlevich**

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design", St. Petersburg  
Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Design and Technology of Garment Products.  
191186, St. Petersburg, st. Bolshaya Morskaya, 18  
Tel. +7 (812) 310-39-11  
E-mail: esurzhenko@mail.ru

**Rodicheva Margarita Vsevolodovna**

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Oryol State University named after. I.S. Turgenev."  
Candidate of Technical Sciences, Head. Department of Fashion Industry  
302026, Orel, st. Komsomolskaya, 95  
Tel. 8(920) 287-93-32  
E-mail: rodicheva.unpk@gmail.com

© А.В. Абрамов, Е.Я. Сурженко, В.В. Кургузов, М.В. Родичева, 2024



В.Е. ПАРШАКОВА, Е.В. ЖАРКИХ, Ю.И. ЛОКТИОНОВА, А.В. КОСЬКИН, А.В. ДУНАЕВ

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО РАЗБРОСА ПАРАМЕТРОВ МИКРОЦИРКУЛЯТОРНО-ТКАНЕВЫХ СИСТЕМ ОРГАНИЗМА ЧЕЛОВЕКА С ПОМОЩЬЮ МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ ПОРТАТИВНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ

**Аннотация.** Работа посвящена изучению физиологического разброса параметров микроциркуляторно-тканевых систем организма человека в нормальных условиях и при проведении функциональной пробы. Результаты получены *in vivo* с помощью мультимодальных портативных анализаторов, реализующих методы лазерной доплеровской флоуметрии и флуоресцентной спектроскопии. Проведён комплексный анализ данных и расчёт коэффициентов вариации параметров микроциркуляторно-тканевых систем организма человека для различных топографо-анатомических участков кожи.

**Ключевые слова:** лазерная доплеровская флоуметрия, флуоресцентная спектроскопия, вариабельность, физиологический разброс, портативные мультимодальные анализаторы, микроциркуляция крови, биоткань.

### Введение

На сегодняшний день изучение функционирования микроциркуляторно-тканевых систем (МТС) организма человека привлекает внимание всё большего числа врачей различных специальностей и научных исследователей. Такой повышенный интерес объясняется тем фактом, что изменения в МТС коррелируют со сдвигами в центральной гемодинамике – это позволяет использовать параметры периферического кровотока в качестве прогностических и диагностических критериев в оценке общего функционального состояния организма [1]. МТС представляет собой совокупность капилляров, окончаний нервных волокон, лимфатических микрососудов и клеток биологических тканей, расположенных вокруг них. Данная система обеспечивает единство метаболизма, кровоснабжения, поддержание внутреннего гомеостаза органов и тканей, адаптацию всего организма к различным условиям жизнедеятельности. МТС первыми реагируют на любые изменения при различных патологических процессах и участвуют в восстановлении саморегуляции отдельных органов и организма в целом.

Сложность адекватной оценки функционального состояния МТС связана с большой вариабельностью их параметров. Параметры МТС могут изменяться у одного и того же человека в течение дня, недели, месяца, причём эти изменения могут достигать 2 – 4 раз. На гетерогенность состояния системы микроциркуляции крови могут оказывать влияние различные факторы, к которым относят возраст, пол, анатомический участок измерения, физическую и умственную активность, температуру тела и воздуха в помещении, приём пищи и др. [2].

Для оценки параметров МТС организма человека принято использовать неинвазивные оптические методы, в том числе методы лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ) и флуоресцентной спектроскопии (ФС) [3–5]. Одним из преимуществ оптических методов является возможность неинвазивной оценки состояния капиллярного сегмента сердечно-сосудистой системы, являющегося первым звеном в цепи функциональных нарушений при различных социально-значимых заболеваниях, приводящих к патологиям более крупных сосудов и системы кровообращения в целом.

Метод ЛДФ основывается на зондировании тканей лазерным излучением и анализе рассеянной и отражённой от движущихся в тканях эритроцитов составляющей светового потока. Когда когерентное излучение от лазерного источника попадает в биологическую ткань, оно рассеивается и частично поглощается. Лазерное излучение, отражённое от статических компонентов ткани, не изменяет своей частоты, в то время как лазерное излучение, отражённое от движущихся частиц (эритроцитов), характеризуется смещением частоты в соответствии с эффектом Доплера. Величина регистрируемого сигнала ЛДФ зависит от концентрации эритроцитов в зондируемом объёме биоткани и средней скорости их



движения. Сигнал перфузии, регистрируемый методом ЛДФ, имеет сложную структуру, состоящую из наложения нескольких колебательных компонент. Изначально считалось, что колебания сигнала ЛДФ являются источником невоспроизводимости, возникающей вследствие стохастических процессов, однако позднее было установлено, что анализ колебаний ЛДФ позволяет дополнительно изучать механизмы регуляции микроциркуляторного кровотока в широком спектре частот (от 0,0095 до 2 Гц). Для анализа осцилляций перфузии в настоящее время широко используется вейвлет-преобразование с применением в качестве материнского вейвлета Морле [1, 6].

Метод ФС основан на использовании оптического излучения с длиной волны в ультрафиолетовой или видимой области спектра для облучения биологической ткани и записи спектров автофлуоресценции эндогенных и экзогенных флуорофоров [4,7]. Биологические ткани содержат множество естественных эндогенных флуорофоров с различными характеристиками, такими как поглощение и эмиссия в разных областях спектра, квантовый выход и время жизни флуоресценции. Общий автофлуоресцентный сигнал зависит от количества и пространственного распределения флуорофоров в биологической ткани, а также от её метаболического статуса и морфологии в нормальных и патологических состояниях. Среди веществ, которые проявляют наиболее яркую автофлуоресценцию в биологических тканях, можно выделить коферменты NADH и FAD, структурные белки коллаген и эластин, аминокислоты триптофан и тирозин, а также порфирин, липофусцины и меланин [8,9].

Проведённые ранее исследования вариабельности сигналов ЛДФ и ФС, выполненные с использованием стационарных приборов (рисунок 1а), показали высокие значения вариабельности для некоторых из исследуемых параметров МТС: показателя потребления кислорода, показателя извлечения кислорода, индекса удельного потребления кислорода в ткани (с учетом нутритивного кровотока) [10,11]. Авторы связывают полученные результаты с общей высокой вариабельностью тканевой перфузии ввиду её пространственной неоднородности, методологическими погрешностями измерений и влиянием различий диагностического объёма используемых методов. Использование оптического волокна в стационарных устройствах также может вносить погрешности в измерения в связи со сложностью соблюдения одинаковых условий при его установке и креплении на биоткани. Кроме того, сравнение регистрируемых параметров МТС на приборах различного исполнения (стационарных и портативных) крайне важно при интерпретации получаемой диагностической информации [12]. Данная работа посвящена исследованию физиологической вариабельности параметров МТС с применением новых мультимодальных портативных анализаторов «ЛАЗМА ПФ» (ООО НПП «ЛАЗМА», Москва), внешний вид которых представлен на рисунке 1б.



Рисунок 1 – Внешний вид стационарного диагностического комплекса «ЛАКК-М» (а) и портативного анализатора «ЛАЗМА ПФ» (б)

Цель данной работы – оценить физиологическую вариабельность параметров микроциркуляторно-тканевых систем организма человека при применении портативных мультимодальных анализаторов, реализующих методы ЛДФ и ФС.

### Материалы и методы

Экспериментальные исследования проводились с использованием распределённой системы носимых мультимодальных анализаторов «ЛАЗМА ПФ», которые реализуют методы ЛДФ и ФС и передают измеренные данные на персональный компьютер по беспроводному протоколу Bluetooth [13, 14]. В качестве источников излучения используются VCSEL-лазер с длиной волны 850 нм (канал ЛДФ) и светодиод с длиной волны излучения 365 нм (канал ФС). Непосредственное освещение ткани через окно в задней панели устройства и отсутствие оптического волокна, а также более удобная фиксация устройства на теле испытуемого снижают вероятность возникновения артефактов движения при проведении измерений.

Исследования включали одновременную регистрацию сигналов ЛДФ и ФС длительностью 10 мин (базовая запись), а также проведение окклюзионной пробы (ОП) с пережатием плечевой артерии, с помощью манжеты тонометра, в которой нагнетался воздух до достижения давления на уровне 200 мм рт. ст. Окклюзионная проба длилась 3 мин, после чего в течение 7 мин осуществлялась запись восстановления перфузии до исходного уровня. Проведение ОП с последующей оценкой таких параметров, как время восстановления кровотока после окклюзионной пробы и максимальный уровень кровотока во время постокклюзионной гиперемии позволяет оценить функциональное состояние малых кровеносных сосудов и адаптационные резервы МТС [15]. Все исследования проводились примерно в одно и то же время суток, чтобы избежать влияния циркадных ритмов на кровообращение, при стандартизированной комнатной температуре окружающей среды  $23 \pm 1$  °C. Во время проведения базового теста (БТ) испытуемый располагался в положении лёжа на спине, а во время ОП – сидя за столом, руки при этом находились на столе на уровне сердца (рисунок 2). В исследовании приняли участие 5 мужчин и 6 женщин в возрасте  $23 \pm 3$  лет. У каждого волонтера было проведено 10 измерений БТ, а у 5 волонтеров ещё дополнительно проводилось по 10 исследований с ОП.

При проведении измерений анализаторы закреплялись на коже лобной части головы (при измерениях БТ), на дорсальной поверхности предплечий в точках, расположенных на медиальной линии на 2 см выше шиловидного отростка, на вентральной поверхности дистальных фаланг 3 пальцев рук и на плантарной поверхности дистальных фаланг 1 пальцев ног (при измерениях БТ). Анализаторы располагались симметрично с правой и с левой стороны тела. Предварительно поверхность кожи в месте крепления анализаторов очищалась с помощью хлоргексидина. Расположение анализаторов на теле испытуемого представлено на рисунке 2 для БТ (рисунок 2а) и ОП (рисунок 2б).

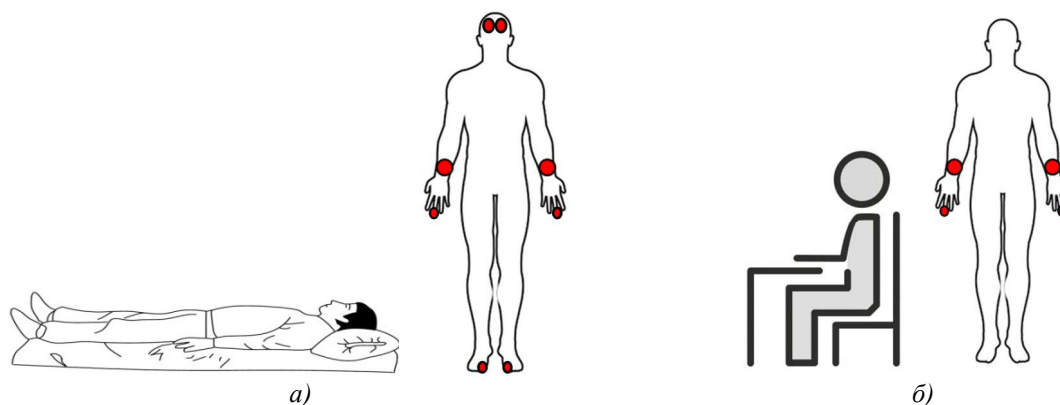


Рисунок 2 – Расположение добровольца и места фиксации анализаторов во время базовых измерений (а) и во время ОП (б)

Кожа в области запястий представляет собой неакральный участок кожи. Этот тип кожи имеет волосяной покров и покрывает практически всю поверхность тела человека, в

приповерхностных слоях кожи такого типа содержится малое количество артериоло-венулярных анастомозов (АВА), поэтому кровоток в этой области выполняет прежде всего нутритивную функцию [16]. Нервная регуляция данного типа кожи включает как симпатические норадренергические нервы, сужающие сосуды, так и симпатические холинэргические нервы, активирующих вазодилатацию [17]. Важно отметить, что значения перфузии и внутрисосудистого давления микрососудов кожи обычно выше в областях, содержащих АВА (акральные участки в области подушечек пальцев рук и ног). Зоны кожи без АВА характеризуются более низким уровнем кровотока в микрососудах и более высоким вкладом венозного компонента.

В ходе выполнения работы были рассчитаны и проанализированы следующие параметры:

- $I_m$  – показатель микроциркуляции крови, характеризующий средний уровень перфузии тканей кровью за единицу времени и измеряющийся в перфузионных (относительных) единицах;

- значения амплитуд колебаний кровотока в микроциркуляторном русле: амплитуда эндотелиальных колебаний ( $A_\Delta$ , 0,009 – 0,02 Гц), амплитуда нейрогенных колебаний ( $A_n$ , 0,02 – 0,06 Гц), амплитуда миогенных колебаний ( $A_m$ , 0,06 – 0,2 Гц), амплитуда дыхательных колебаний ( $A_d$ , 0,2 – 0,6 Гц), амплитуда сердечных колебаний ( $A_c$ , 0,6 – 2 Гц) [6,18,19];

- $A_{NADH}$  – нормированная амплитуда флуоресценции NADH. Данный параметр рассчитывался по формуле:

$$A_{NADH} = I_{460} / I_{365}, \quad (1)$$

где  $I_{460}$  – интенсивность флуоресценции флуорофора NADH в биологических тканях на длине волны 460 нм,

$I_{365}$  – интенсивность обратно отражённого излучения на длине волны возбуждения автофлуоресценции 365 нм;

- $K_v$  – коэффициент вариации параметров МТС [1].

- РКК – резерв капиллярного кровотока, рассчитываемый по данным окклюзионной пробы:

$$PKK = \left( \frac{I_{m\_макс}}{I_{m\_БТ}} \right) \cdot 100\%, \quad (2)$$

где  $I_{m\_макс}$  – максимальное значение перфузии в постокклюзионном периоде,

$I_{m\_БТ}$  – среднее значение перфузии до окклюзии.

$K_v$  отдельно рассчитывался для отдельных параметров МТС каждого испытуемого, принимая за среднее арифметическое среднее значение параметра МТС по результатам всех измерений у данного волонтера.

Для оценки колебательной составляющей  $I_m$  использовался спектральный вейвлет-анализ колебаний с применением непрерывного вейвлет-преобразования [20, 21].

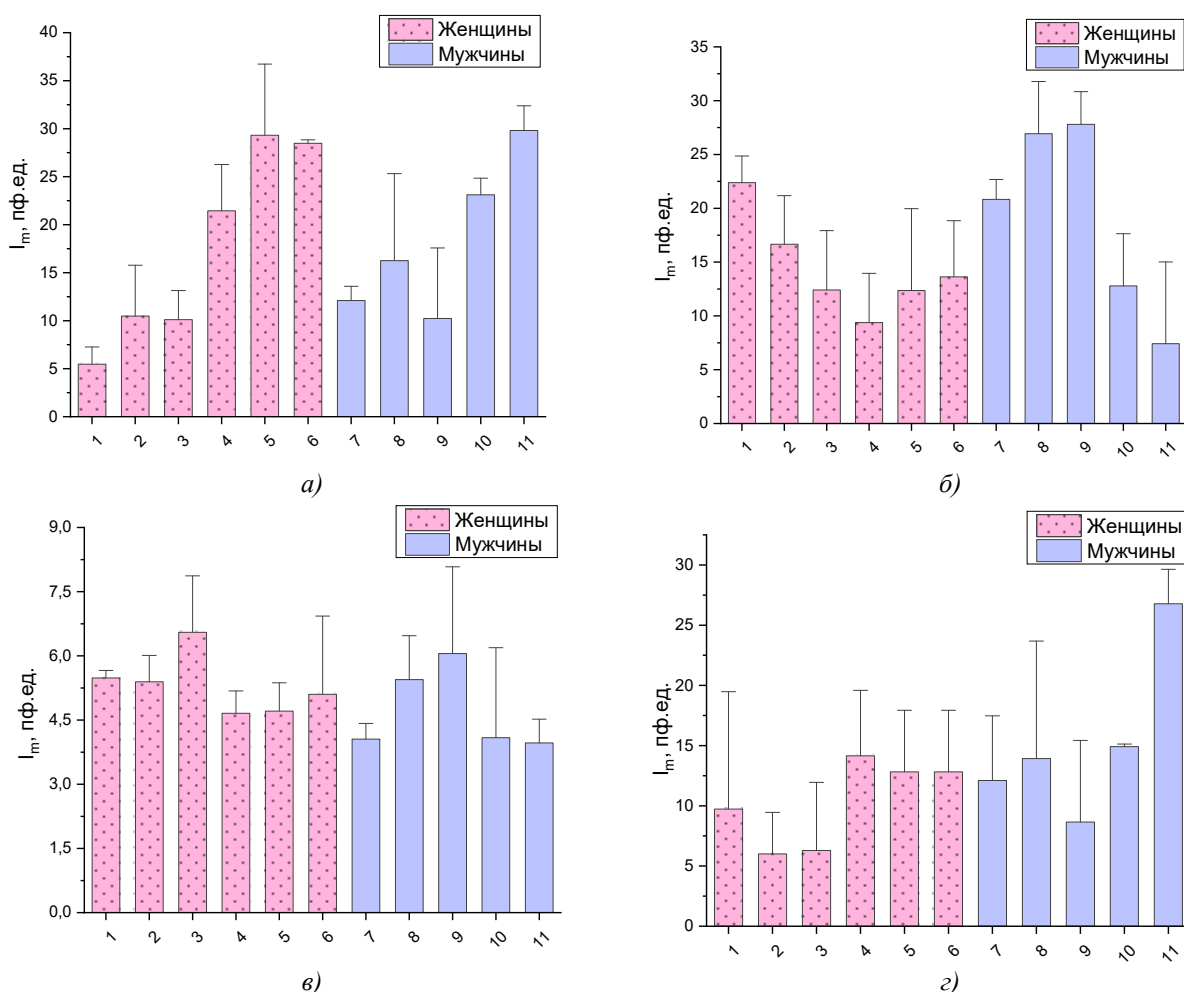
Статистический анализ данных был проведен в программной среде «Origin Pro 2021». Из-за ограниченного размера выборки для проверки статистической значимости различий использовался непараметрический U-критерий Манна-Уитни (значения  $p < 0,05$  считались значимыми). Результаты представлены в виде среднего значения  $\pm$  СКО, если не указано иное.

### Результаты

На рисунке 3 представлены усреднённые значения показателя микроциркуляции крови по каждому волонтеру в различных областях кожного покрова.

Из полученных результатов видно, что наибольшее значение показателя микроциркуляции крови ( $I_m$ ) характерно для области измерения на 3 пальце руки, в среднем уровень данного параметра составляет  $23,1 \pm 4,2$  пф.ед., а наименьший уровень отмечен на предплечье, и в среднем составляет  $5,2 \pm 1,0$  пф.ед. В области подошвенной поверхности 1 пальцев ног показатель микроциркуляции крови составил  $10,6 \pm 2,9$  пф.ед. Кожа головы в области лба характеризуется значениями показателя микроциркуляции крови на уровне  $12,7 \pm 3,6$  пф.ед.

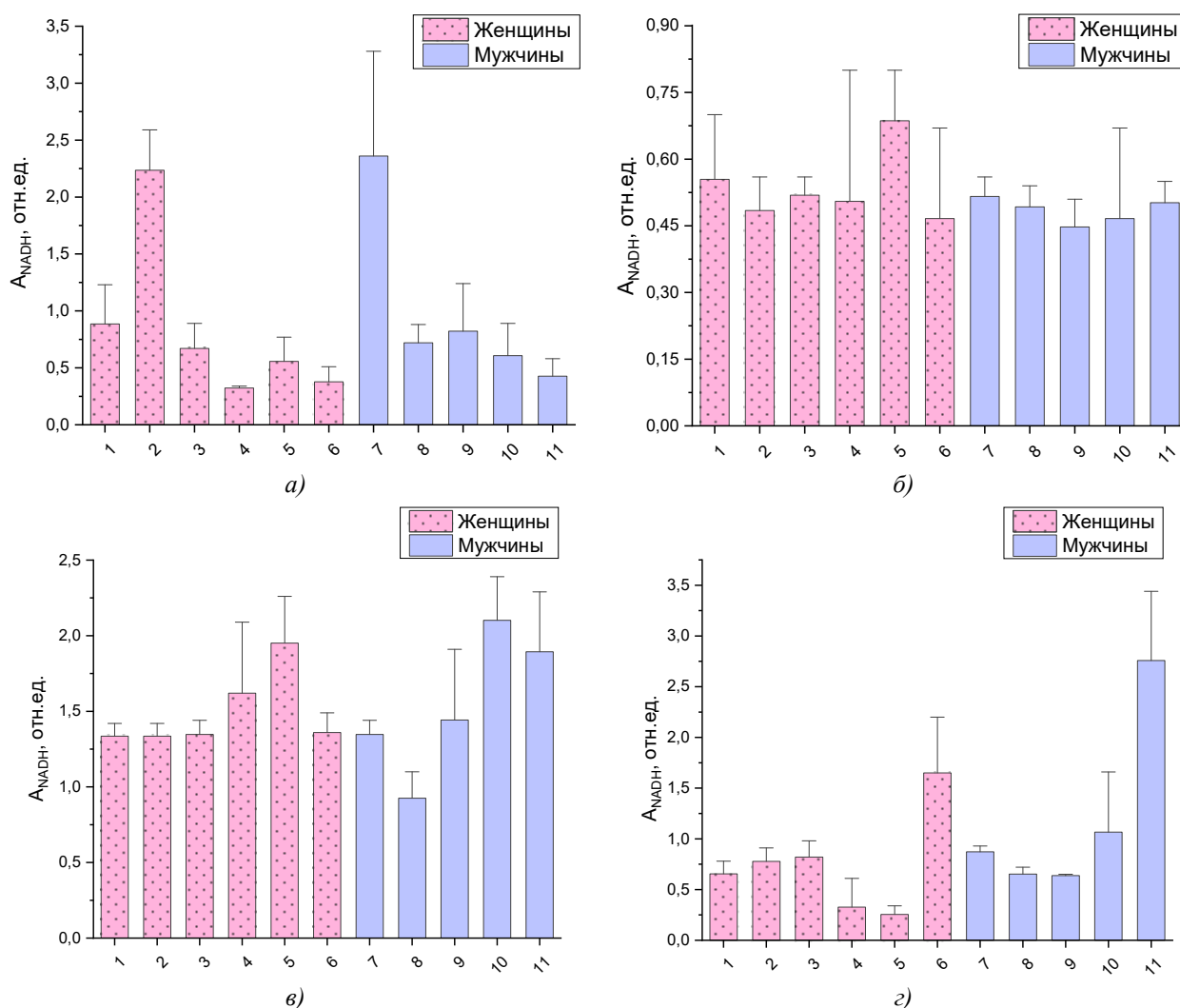
Не было выявлено статистически значимых различий в среднем уровне показателя микроциркуляции крови между группами мужчин и женщин. Во всех областях исследования значения  $I_m$  для волонтеров женского и мужского пола сопоставимы.



**Рисунок 3 – Показатель микроциркуляции крови волонтеров:** а – в области кожи лба, б – в области ладонной поверхности 3 пальца руки, в – в области кожи тыльной стороны предплечья, г – в области подошвенной поверхности 1 пальца ноги

На рисунке 4, представлены значения нормированной амплитуды интенсивности флуоресценции NADH, измеренные в 4 областях тела. Проанализировав данные, можно оценить средние значения  $A_{NADH}$  для каждой области. Наибольшие значения  $A_{NADH}$  отмечены в областях кожи лба и предплечий ( $1,7 \pm 0,9$  отн.ед. и  $1,3 \pm 0,7$  отн.ед. соответственно), наименьшее значение соответствует области пальца руки и составляет  $0,4 \pm 0,1$  отн.ед. В области кожи пальцев ног значение  $A_{NADH}$  составило  $0,7 \pm 0,3$  отн.ед. Низкие значения в области кожи пальцев рук и ног могут объясняться отличиями в анатомическом строении микроциркуляторного русла этих областей, содержащего большое количество артериоло-веноулярных анастомозов и характеризующегося высокими значениями тканевой перфузии.

При оценке параметров микроциркуляторно-тканевых систем необходимо учитывать вариабельность исследуемых параметров. Коэффициент вариации показателя микроциркуляции крови показывает разброс исследуемых значений и считается допустимым в пределах от 20 до 40 % [1]. В таблице 1 представлены рассчитанные значения коэффициента вариации параметров микроциркуляторно-тканевых систем при проведённых десятидневных измерениях для женщин (волонтеры 1 – 6) и мужчин (волонтеры 7 – 11) для каждой области измерений.



**Рисунок 4 – Значения нормированной амплитуды интенсивности флуоресценции NADH кожи волонтеров: а – в области лба, б – в области ладонной поверхности 3 пальца руки, в – в области кожи тыльной стороны предплечья, г – в области подошвенной поверхности 1 пальца ноги**

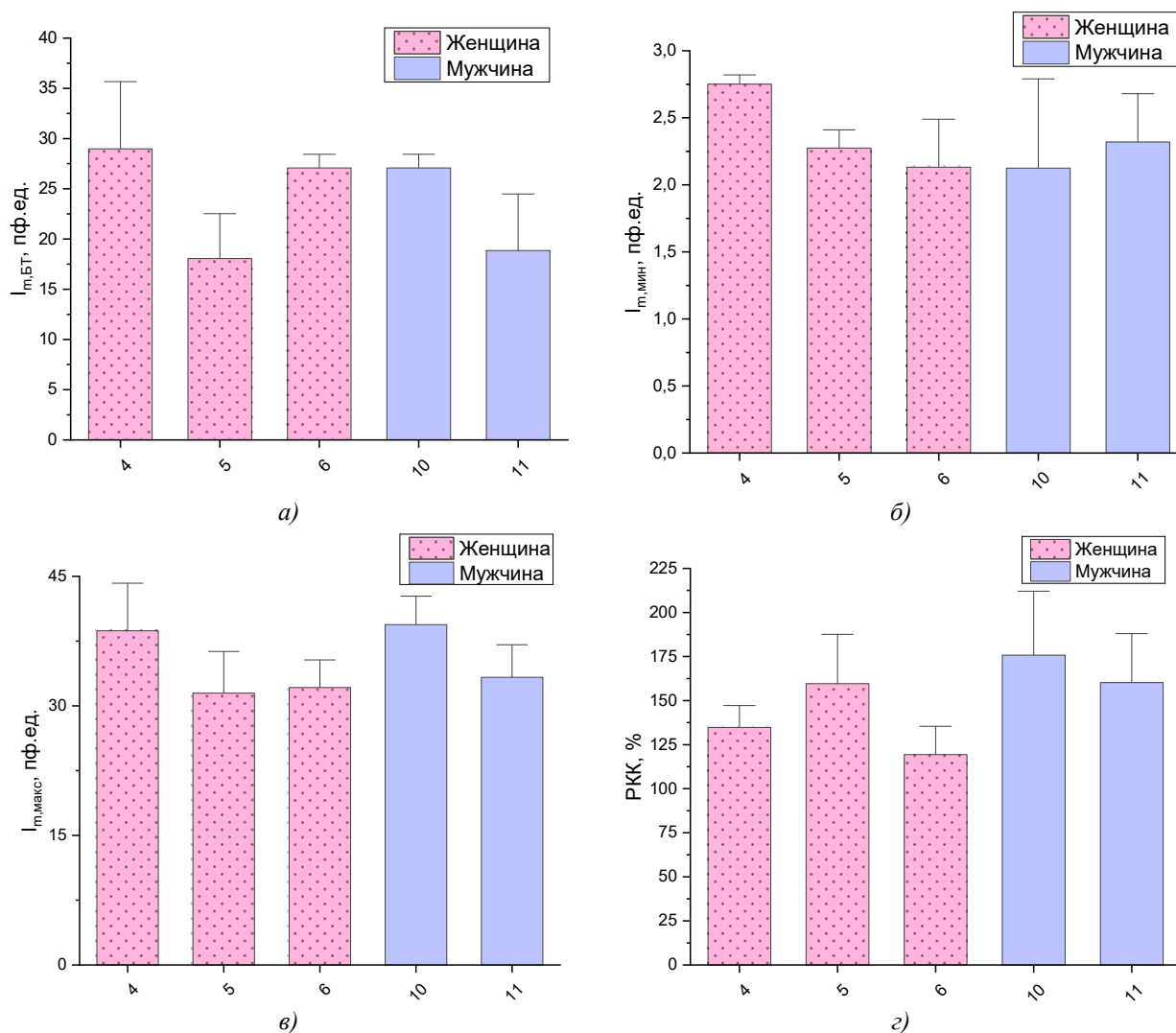
Коэффициент вариации параметра  $I_m$  в области кожи пальцев рук колеблется в интервале от 9 % до 43 %, в области кожи лба составляет порядка 30 %, в области пальцев ног в большинстве случаев превышает 40 %, а в области предплечья не превышает 30 %. Коэффициент вариации параметра  $A_{NADH}$  в коже пальца руки, пальца ноги и предплечья в большинстве случаев находится в пределе до 40 %, а область кожи лба характеризуется высокими значениями данного параметра – в большинстве случаев больше 50 %. Большая вариабельность в области лба может быть связана со сложностью фиксации устройств. Стоит отметить, что в коже лба впервые проводились подобные измерения и значения вариабельности параметров, регистрируемых методами ЛДФ и ФС, для данной области оценены впервые.

Из проанализированных амплитуд колебаний тканевой перфузии в активном диапазоне (эндотелиальные, нейрогенные и миогенные) наибольшей воспроизводимостью характеризуются миогенные колебания. Коэффициент вариации параметра  $A_m$  не превышает 40 % для большинства волонтеров при исследованиях в областях кожи вентральной поверхности дистальных фаланг 3 пальцев рук, лобной части головы и дорсальной поверхности предплечий. Амплитуды пассивных колебаний (дыхательные и сердечные) характеризуются хорошей воспроизводимостью в областях кожи вентральной поверхности дистальных фаланг 3 пальцев рук и дорсальной поверхности предплечий (до 30 % в большинстве исследований).

Таблица 1 – Коэффициенты вариации параметров МТС организма человека

№ волонтера	K <sub>v</sub> , %						
	I <sub>m</sub>	A <sub>э</sub>	A <sub>н</sub>	A <sub>м</sub>	A <sub>д</sub>	A <sub>с</sub>	A <sub>NADH</sub>
Вентральная поверхность дистальных фаланг 3 пальцев рук							
1	23,4	43,6	26,9	29,1	38,9	23,5	27,3
2	24,7	37,0	39,6	34,9	48,7	20,4	24,4
3	42,4	40,9	37,8	34,9	30,6	32,0	18,4
4	24,0	35,1	32,7	26,2	19,3	22,8	53,5
5	17,3	63,4	49,0	31,6	20,8	20,9	19,1
6	8,5	62,8	78,0	19,3	10,1	28,6	20,6
7	12,4	65,6	45,2	29,2	16,3	23,8	8,3
8	13,2	29,1	14,6	19,5	15,6	17,8	15,2
9	12,9	74,7	58,4	36,8	19,1	9,2	13,6
10	29,9	23,9	29,7	32,8	30,5	31,7	34,9
11	37,0	59,0	43,8	18,3	21,8	20,8	27,1
Плантарная поверхность дистальных фаланг 1 пальцев ног							
1	28,0	23,8	61,8	72,7	84,5	83,1	20,1
2	65,5	60,1	58,2	64,1	72,3	70,5	17,0
3	14,6	40,6	23,9	39,7	14,5	28,7	21,4
4	49,6	58,9	43,1	46,9	55,8	33,4	35,0
5	38,0	56,5	35,5	42,5	26,8	59,9	59,1
6	25,1	22,6	24,2	20,9	22,3	35,0	23,8
7	30,6	22,7	27,2	17,3	28,7	17,3	7,2
8	48,1	19,6	17,2	15,3	31,6	44,9	8,2
9	54,4	64,9	65,0	57,3	59,2	44,9	8,2
10	37,7	33,7	20,9	27,8	58,6	58,1	2,4
11	54,0	47,3	47,9	57,2	64,0	70,7	8,5
Лобная часть головы							
1	33,2	62,7	57,6	91,0	40,0	51,2	53,3
2	33,8	51,4	29,2	20,7	29,2	30,2	12,1
3	35,3	40,6	40,3	53,2	30,7	38,9	23,8
4	27,3	33,8	33,9	38,4	26,1	33,0	64,8
5	31,6	46,1	55,6	33,6	27,4	27,4	22,1
6	40,2	33,0	50,5	63,1	78,2	47,0	27,7
7	51,4	16,5	23,4	65,8	38,9	29,6	70,7
8	38,2	46,1	56,3	29,4	46,3	40,0	25,6
9	49,0	70,5	42,3	44,8	55,7	30,7	50,8
10	17,2	29,8	17,1	18,6	17,9	29,4	64,1
11	27,1	21,4	31,4	46,3	54,7	50,5	25,0
Дорсальная поверхность предплечий							
1	8,8	44,4	48,5	39,0	24,3	22,8	41,4
2	13,6	48,6	33,9	50,3	17,7	50,9	29,7
3	14,6	40,6	23,9	39,7	14,5	28,7	21,4
4	25,0	71,6	26,8	34,3	23,9	51,4	18,7
5	15,8	25,1	36,1	31,5	26,7	29,0	33,2
6	29,7	42,4	32,3	34,4	27,9	32,3	17,5
7	23,6	63,1	55,9	64,9	25,1	42,7	18,9
8	19,7	34,9	41,0	45,7	14,5	22,5	18,1
9	10,4	30,1	23,7	18,7	12,6	8,4	10,5
10	17,6	32,0	36,8	44,7	25,8	26,3	24,4
11	6,7	44,4	39,1	27,4	22,5	26,2	26,9

Отдельно проанализированы параметры микроциркуляторного кровотока при проведении ОП. На рисунке 5 для каждого волонтера представлены усреднённые за все 10 измерений значения параметров  $I_m$  до окклюзионной пробы ( $I_{m\_BT}$ ), уровня минимального  $I_m$  во время окклюзии ( $I_{m\_мин}$ ), и максимального уровня  $I_m$  во время постокклюзионной гиперемии ( $I_{m\_макс}$ ), а также значения рассчитанного параметра РКК. Вариабельность периферического кровотока при ОП связана с изменением кровенаполнения тканей от базального уровня до максимальных значений во время постокклюзионной реактивной гиперемии.



**Рисунок 5 –Регистрируемые при проведении окклюзионной пробы параметры: а –  $I_m$  до окклюзионной пробы, б –  $I_m$  во время окклюзионной пробы, в –  $I_m$  в постокклюзионном этапе, г – РКК**

В таблице 2 представлены коэффициенты вариации параметров ОП. Коэффициенты вариации оцениваемых параметров ОП (за исключением базового уровня перфузии) на всех стадиях измерения не превышают 25 %, что подтверждает эффективность данного теста для получения более воспроизводимых данных.

Отмечены различия в величине отклика системы микроциркуляции крови на окклюзионную пробу у волонтеров женского и мужского пола. У женщин РКК в среднем составил  $133,2 \pm 20,3$  %, а у мужчин –  $172,7 \pm 11,0$  %. Полученные данные сопоставимы с данными, опубликованными ранее по результатам исследований со стационарными устройствами ЛДФ [10, 11].

Полученные в настоящем исследовании значения вариабельности в целом соответствуют ранее опубликованным результатам измерений параметров  $I_m$ ,  $A_{NADH}$  и РКК, полученным с использованием стационарных устройств ЛДФ и ФС в области кожи ладонной



поверхности средних пальцев рук и тыльной поверхности предплечий [9, 10]. В данной работе проведено комплексное исследование вариабельности параметров, регистрируемых портативными анализаторами ЛДФ и ФС, в 4 разных участках тела, включающее анализ вариабельности амплитудно-частотных характеристик сигналов ЛДФ и параметров ОП (минимальное и максимальное значение  $I_m$ , РКК). Стоит отметить, что параметры вариабельности сигналов ЛДФ и ФС в областях кожи лобной части головы и подошвенной поверхности 1-ых пальцев ног к настоящему времени всё ещё мало изучены.

Таблица 2 – Коэффициенты вариации параметров окклюзионной пробы

№ волонтера	K <sub>v</sub> , %			
	I <sub>m</sub> БТ	I <sub>m</sub> мин	I <sub>m</sub> макс	РКК
4	17,6	13,1	12,7	7,6
5	20,8	5,2	11,5	13,5
6	11,1	10,7	6,9	8,3
10	31,7	15,9	11,7	13,6
11	26,3	12,3	8,6	24,5

### Заключение

В настоящей работе впервые проведена оценка физиологического разброса параметров МТС организма человека, регистрируемых с помощью портативных анализаторов ЛДФ и ФС в четырёх областях тела: на коже лобной части головы, на дорсальной поверхности предплечий, на вентральной поверхности дистальных фаланг 3 пальцев рук и на плантарной поверхности дистальных фаланг 1-ых пальцев ног. Проанализированы как значения среднего уровня перфузии, амплитуд колебаний сигнала ЛДФ и амплитуды флуоресценции кожи при базовом тесте, так и параметры МТС при проведении окклюзионной пробы.

Согласно результатам проведённых исследований значения параметров  $I_m$ ,  $A_d$ ,  $A_m$ ,  $A_c$  демонстрируют наименьший уровень коэффициента вариации в коже ладонной поверхности средних пальцев рук и тыльной поверхности предплечий. Амплитуды осцилляций перфузии в эндотелиальном и нейрогенном диапазонах  $A_e$  и  $A_n$  отличаются наибольшими значениями коэффициента вариации, что может являться следствием более длительного периода их проявления (а значит и малого количества регистрируемых единичных колебаний в этих частотных диапазонах за время проведения измерения) [1], и этот факт необходимо учитывать при интерпретации результатов проводимых измерений.

Наибольшей вариабельностью параметры ЛДФ характеризуются при измерениях в области пальцев ног – здесь коэффициент вариации в среднем составляет порядка 40-50 %. Такой результат может быть связан со спецификой области измерения – несмотря на то, что перед началом измерений волонтерам давалось время на адаптацию к условиям окружающей среды, предшествующие измерениям ношение обуви и ходьба могли оказать влияние на столь большую вариабельность параметров в этой области.

Параметр  $ANADH$  характеризуется приемлемыми значениями коэффициента вариабельности (до 30 %) у большинства волонтеров в областях кожи подушечек пальцев рук и ног, а также предплечий.

В области кожи головы показатель микроциркуляции показывает приемлемый уровень вариабельности (до 35 %). Показатели  $ANADH$  характеризуются более высокой вариабельностью (до 54 %), что может быть связано со сложностью фиксации анализаторов, так как данная область относительно мало изучена с применением технологий ЛДФ и ФС, и методология проведения подобных измерений (учёт различного надавливания на биоткань при фиксации приборов и т.д.) требует более тщательной проработки [22,23].

Параметры, полученные с применением окклюзионной пробы, демонстрируют высокую воспроизводимость (коэффициент вариации в большинстве случаев ниже 20 %), что подтверждает преимущество использования функциональных проб для повышения воспроизводимости результатов исследования и постановки диагноза.

Результаты исследования в целом соответствуют ранее опубликованным данным, полученным на стационарных устройствах ЛДФ и ФС, однако, в настоящей работе приведены

данные по неисследованным ранее областям (кожа головы и подушечек первых пальцев ног), а также впервые для портативного варианта прибора проанализированы вариабельность параметров амплитудно-частотного спектра сигналов ЛДФ и нормированной амплитуды флуоресценции NADH.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-25-00522).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крупаткин, А.И. Функциональная диагностика состояния микроциркуляторно-тканевых систем: колебания, информация, нелинейность / А.И. Крупаткин, В.В. Сидоров // Руководство для врачей. – М.: 2-е изд. «ЛЕНАНД», 2016. – 496 с.
2. Дунаев, А.В. Мультимодальная оптическая диагностика микроциркуляторно-тканевых систем организма человека: монография / А. В. Дунаев. – Старый Оскол: ТНТ, 2022. – 440 с.
3. Литвин, Ф.Б. Комплексное применение природных биостимуляторов в тренировочном процессе высококвалифицированных легкоатлетов / Ф.Б. Литвин, Т.М. Брук, П.А. Терехов [и др.] // Человек. Спорт. Медицина. – 2018. – Т. 18. – № 5. – С. 135-139.
4. Lakowicz, J. Principles of Fluorescence Spectroscopy / J. Lakowicz // Boston, MA: Springer, 2006. – 954 p.
5. Mycek, M. Handbook of Biomedical Fluorescence / М. Mycek, В. Pogue. // CRC Press, 2003. – 688 p.
6. Кирилина, Т.В. Респираторнозависимые колебания кровотока в системе микроциркуляции кожи человека / Т. В. Кирилина, Г.В. Красников, А.В. Танканга [и др.] // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2009. – Т. 8. – № 2. – С. 58-62.
7. Рогаткин, Д.А. Физические основы лазерной клинической флуоресцентной спектроскопии in vivo / Д.А. Рогаткин // Медицинская физика. – 2014. – Т. 4. – № 64. – С. 78-96.
8. Bartolomé, F. Measurement of mitochondrial NADH and FAD auto fluorescence in live cells / F. Bartolomé, A. Abramov // Mitochondrial Medicine. – 2015. – Vol. 1264. – P. 263-270.
9. Жеребцов, Е.А. Флуоресцентная диагностика митохондриальной функции в эпителиальных тканях in vivo: монография / Е.А. Жеребцов, В.В. Дрёмин, А.И. Жеребцова [и др.] // ОГУ имени И.С. Тургенева, 2018. – 107 с.
10. Дунаев, А.В. Анализ индивидуальной вариабельности параметров в лазерной флуоресцентной диагностике / А.В. Дунаев, В.В. Дрёмин, Е.А. Жеребцов [и др.] // Биотехносфера. – 2013. – № 2. – С. 39-47.
11. Дунаев, А.В. Анализ физиологического разброса параметров микроциркуляторно-тканевых систем / А.В. Дунаев, И.Н. Новикова, А.И. Жеребцова [и др.] // Биотехносфера. – 2013. – № 5. – С. 44-53.
12. Михайлова, М.А. Сравнительная оценка параметров лазерной доплеровской флоуметрии кожи здоровых лиц при использовании аппаратов различной модификации / М.А. Михайлова, А.А. Федорович, А.Ю. Горшков [и др.] // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2023. – Т. 22. – № 3. – С. 41-50.
13. Dunaev, A. Wearable Devices for Multimodal Optical Diagnostics of Microcirculatory-Tissue Systems: Application Experience in the Clinic and Space / A. Dunaev // Journal of Biomedical Photonics & Engineering. – 2023. – Vol. 9. – № 2. – P. 1-10.
14. Zharkikh, E. Sampling volume assessment for wearable multimodal optical diagnostic device / E. Zharkikh, V. Dremine, A. Dunaev // Journal of Biophotonics. – 2023. – Vol. 16. – № 9. – e202300139.
15. Жарких Е.В. Возможности исследования изменений амплитуд колебаний кожного кровотока с помощью адаптивного вейвлет-анализа при проведении окклюзионных проб / Е.В. Жарких, А.И. Жеребцова, И.Н. Маковик [и др.] // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2015. – Т. 314. – №6. – С.114-121.
16. Salerud, E. Rhythmical variations in human skin blood flow / E. Salerud, T. Tenland, G. Nilsson, P. Oberg // International journal of microcirculation, clinical and experimental. – 1983. – Vol. 2. – № 2. – P. 91-102.
17. Johnson, J. Local thermal control of the human cutaneous circulation / J. Johnson, D. Kellogg // Journal of Applied Physiology. – 2010. – Vol. 109. – № 4. – P. 1229-1238.
18. Tuma, R. Microcirculation: Second edition / R. Tuma, W. Duran. K. Ley // Academic Press, 2011. – 1000 p.
19. Дунаев, А.В. Методы и приборы неинвазивной медицинской спектrophотометрии: пути обоснования специализированных медико-технических требований / А.В. Дунаев, Е.А. Жеребцов, Д.А. Рогаткин // Приборы. – 2011. – Т. 127. – № 1. – С. 40-48.
20. Козлов, В.И. Лазерная доплеровская флоуметрия в оценке состояния и расстройств микроциркуляции крови / В.И. Козлов, Г.А. Азизов, О.А. Гурова [и др.] // Методическое пособие для врачей. – 2012. – 32 с.
21. Kvernmo, H. Oscillations in the human cutaneous blood perfusion signal modified by endothelium-dependent and endothelium-independent vasodilators / H. Kvernmo, A. Stefanovska, K. Kirkeboen [et al.] // Microvascular research. – 1999. – Vol. 57. – № 3. – P. 298-309.
22. Zharebtsov, E. Diagnosis of Skin Vascular Complications Revealed by Time-Frequency Analysis and Laser Doppler Spectrum Decomposition / E. Zharebtsov, I. Kozlov, V. Dremine [et al.] // IEEE TRANSACTIONS ON BIOMEDICAL ENGINEERING. – 2023. – Vol. 70. – № 1. – P. 3-13.
23. Zharebtsov, E. The influence of local pressure on evaluation parameters of skin blood perfusion and fluorescence / E. Zharebtsov, K. Kandurova, E. Seryogina [et al.] // Proc. SPIE. – 2017. – 10336. – 1033608.

**Паршакова Виктория Евгеньевна**  
Орловский государственный  
университет имени И.С. Тургенева,  
г. Орёл, Россия  
студент кафедры «Приборостроение,  
метрология и сертификация»  
лаборант научно–технологического  
центра биомедицинской фотоники  
Россия, г. Орёл, ул. Комсомольская, 95  
8 (4862) 41-98-37  
E-mail: Viktorya.Parshak@yandex.ru

**Жарких Елена Валерьевна**  
Орловский государственный  
университет имени И.С.  
Тургенева, г. Орёл, Россия  
ассистент кафедры  
«Приборостроение, метрология  
и сертификация»  
стажер–исследователь научно–  
технологического центра  
биомедицинской фотоники  
Россия, г. Орёл, ул.  
Комсомольская, 95  
8 (4862) 41-98-37  
E-mail: ev.zharkikh@gmail.com

**Локтионова Юлия Игоревна**  
Орловский государственный  
университет имени И.С.  
Тургенева, г. Орёл, Россия  
аспирант кафедры  
«Приборостроение, метрология и  
сертификация»  
стажер–исследователь научно–  
технологического центра  
биомедицинской фотоники  
Россия, г. Орёл, ул.  
Комсомольская, 95  
8 (4862) 41-98-37  
E-mail: loktionovaui@yandex.ru

**Коськин Александр Васильевич**  
Орловский государственный  
университет имени И.С. Тургенева,  
г. Орёл, Россия  
профессор кафедры  
«Информационные системы и  
цифровые технологии».  
Россия, г. Орёл, ул. Комсомольская, 95  
8 (4862) 41-98-37  
E-mail: koskin@oreluniver.ru

**Дунаев Андрей Валерьевич**  
Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г.  
Орёл, Россия  
профессор кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»  
ведущий научный сотрудник научно–технологического центра  
биомедицинской фотоники  
Россия, г. Орёл, ул. Комсомольская, 95  
8 (4862) 41-98-06  
E-mail: dunaev@bmecenter.ru

V.E. PARSHAKOVA, E.V. ZHARKIKH, YU.I. LOKTIONOVA, A.V. KOSKIN, A.V. DUNAEV

## STUDY OF PHYSIOLOGIC VARIABILITY OF MICROCIRCULATORY- TISSUE SYSTEMS PARAMETERS OF HUMAN ORGANISM USING MULTIMODAL PORTABLE ANALYZERS

**Abstract.** *The work is devoted to study the physiological variation of microcirculatory-tissue systems parameters of human organism in basal conditions and with the use of functional test. The results were obtained in vivo using multimodal portable analyzers implementing the methods of laser Doppler flowmetry and fluorescence spectroscopy. Complex data analysis and calculation of the variation coefficients of microcirculatory-tissue system parameters for different topographic-anatomical areas of human skin were carried out.*

**Keywords:** *laser Doppler flowmetry, fluorescence spectroscopy, variability, physiological scatter, portable multimodal analyzers, blood microcirculation, biotissue.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Krupatkin, A.I. Funkcionalnaya diagnostika sostoyaniya mikrocirkulyatorno-tkanevyh sistem: Kolebaniya, informaciya, nelinejnost. Rukovodstvo dlya vrachej. Izd. 2-e. [Tekst] / A.I. Krupatkin, V.V. Sidorov – M.: LENAND, 2016. – 496 s. (In Russ.).
2. Dunaev, A.V. Multimodalnaya opticheskaya diagnostika mikrocirkulyatorno-tkanevyh sistem organizma cheloveka: monografiya [Tekst] / A.V. Dunaev. – Staryj Oskol: TNT, 2022. — 440 s.: il. (In Russ.).
3. Litvin, F. Comprehensive Application of Natural Biostimulators in the Training of Elite Athletes / F. Litvin, T. Bruk, P. Terekhov [et al.] // Human. Sport. Medicine. – 2018. – T. 18. – № S. – S. 135-139. (In Russ.).
4. Lakowicz, J. Principles of Fluorescence Spectroscopy / J. Lakowicz. // Boston, MA: Springer, 2006. – 954 p.
5. Mycek, M. Handbook of Biomedical Fluorescence / M. Mycek, B. Pogue. // CRC Press, 2003. – 688 p.
6. Kirilina, T. Respirator-dependent blood flow oscillations in human skin microcirculation / T. Kirilina, G. Krasnikov, A. Tankanag [et al.] // Regional blood circulation and microcirculation. – 2009. – Vol. 8. – № 2. – P. 58-62. (In Russ.).
7. Rogatkin, D.A. Fizicheskie osnovy lazernoj klinicheskoy flyuorescentnoj spektroskopii in vivo / D.A. Rogatkin // Medicinskaya fizika. – 2014. – T. 4. – № 64. – S. 78-96. (In Russ.).
8. Bartolomé, F. Measurement of mitochondrial NADH and FAD auto fluorescence in live cells / F. Bartolomé, A. Abramov // Mitochondrial Medicine. – 2015. – Vol. 1264. – P. 263-270.
9. Zherebtsov, E.A. Fluorescentnaya diagnostika mitohondrial'noj funkcii v epitelial'nyh tkanyah in vivo: monografiya / E.A. Zherebtsov, V.V. Dremine, A.I. Zherebtsova [et al.] // OGU imeni I.S. Turgeneva, 2018. – 107 s. (In Russ.).
10. Dunaev, A.V. Analiz individual'noj variabel'nosti parametrov v lazernoj fluorescentnoj diagnostike / A.V. Dunaev, V.V. Dryomin, E.A. Zherebtsov [et al.] // Biotekhnosfera. – 2013. – № 2. – S. 39-47. (In Russ.).

11. Dunaev, A.V. Analiz fiziologicheskogo razbrosa parametrov mikroциркуляторно-тканевых систем / A.V. Dunaev, I.N. Novikova, A.I. Zherebtsova [et al.] // *Biotekhnosfera*. – 2013. – № 5. – S. 44-53. (In Russ.).
12. Mikhailova, M. Comparative evaluation of the parameters of laser Doppler flowmetry of the skin of healthy persons using devices of various modification / M. Mikhailova, A. Fedorovich, A. Gorshkov [et al.] // *Regional blood circulation and microcirculation*. – 2023. – Vol. 22. – № 3. – P. 41-50. (In Russ.).
13. Dunaev, A. Wearable Devices for Multimodal Optical Diagnostics of Microcirculatory-Tissue Systems: Application Experience in the Clinic and Space / A. Dunaev // *Journal of Biomedical Photonics & Engineering*. – 2023. – Vol. 9. – № 2. – P. 1-10.
14. Zharkikh, E. Sampling volume assessment for wearable multimodal optical diagnostic device / E. Zharkikh, V. Dremine, A. Dunaev // *Journal of Biophotonics*. – 2023. – Vol. 16. – № 9. – e202300139.
15. Zharkikh E.V. Vozmozhnosti issledovaniya izmenenij amplitud kolebanij kozhnogo krovotoka s pomoshch'yu adaptivnogo veivlet-analiza pri provedenii okklyuzionnyh prob / E.V. Zharkikh, A.I. Zherebtsova, I.N. Makovik [et al.] // *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*. – 2015. – T. 314. – №6. – S.114-121. (In Russ.).
16. Salerud, E. Rhythmical variations in human skin blood flow / E. Salerud, T. Tenland, G. Nilsson [et al.] // *International journal of microcirculation, clinical and experimental*. – 1983. – Vol. 2. – № 2. – P. 91-102.
17. Johnson, J. Local thermal control of the human cutaneous circulation / J. Johnson, D. Kellogg // *Journal of Applied Physiology*. – 2010. – Vol. 109. – № 4. – P. 1229-1238.
18. Tuma, R. Microcirculation: Second edition / R. Tuma, W. Duran. K. Ley // Academic Press, 2011. – 1000 p.
19. Dunaev, A.V. Metody i pribory neinvazivnoj medicinskoj spektrofotometrii: puti obosnovaniya specializirovannyh mediko-tekhnicheskikh trebovanij / A.V. Dunaev, E.A. Zherebtsov, D.A. Rogatkin // *Pribory*. – 2011. – T. 127. – № 1. – S. 40-48. (In Russ.).
20. Kozlov, V.I. Lazernaya dopplerovskaya floumetriya v otsenke sostoyaniya i rasstrojstv mikroциркуляций krovei / V.I. Kozlov, G.A. Azizov, O.A. Gurova [et al.] // *Metodicheskoe posobie dlya vrachej*. – 2012. – 32 s. (In Russ.).
21. Kvernmo, H. Oscillations in the human cutaneous blood perfusion signal modified by endothelium-dependent and endothelium-independent vasodilators / H. Kvernmo, A. Stefanovska, K. Kirkeboen [et al.] // *Microvascular research*. – 1999. – Vol. 57. – № 3. – P. 298-309.
22. Zherebtsov, E. Diagnosis of Skin Vascular Complications Revealed by Time-Frequency Analysis and Laser Doppler Spectrum Decomposition / E. Zherebtsov, I. Kozlov, V. Dremine [et al.] // *IEEE TRANSACTIONS ON BIOMEDICAL ENGINEERING*. – 2023. – Vol. 70. – № 1. – P. 3-13.
23. Zherebtsov, E. The influence of local pressure on evaluation parameters of skin blood perfusion and fluorescence / E. Zherebtsov, K. Kandurova, E. Seryogina [et al.] // *Proc. SPIE*. – 2017. – Vol. 10336. – P. 1033608.

**Parshakova Victoria Evgenievna**  
Orel State University named after  
I.S. Turgenev, Orel, Russia  
student of the Department  
«Instrument Engineering, Metrology  
and Certification»  
laboratory assistant of Research &  
Development Center of Biomedical  
Photonics  
Russia, Orel, Komsomolskaya St., 95  
8 (4862) 41-98-37  
E-mail: Viktorya.Parshak@yandex.ru

**Zharkikh Elena Valerievna**  
Orel State University named after  
I.S. Turgenev, Orel, Russia  
Teaching assistant of the Department  
«Instrument Engineering, Metrology  
and Certification»  
research assistant of Research &  
Development Center of Biomedical  
Photonics  
Russia, Orel, Komsomolskaya St.,  
95  
8 (4862) 41-98-37  
E-mail: ev.zharkikh@gmail.com

**Loktionova Yulia Igorevna**  
Orel State University named after  
I.S. Turgenev, Orel, Russia  
Postgraduate Student of the  
Department «Instrument  
Engineering, Metrology and  
Certification»  
research assistant of Research &  
Development Center of Biomedical  
Photonics  
Russia, Orel, Komsomolskaya St.,  
95  
8 (4862) 41-98-37  
E-mail: loktionovaui@yandex.ru

**Koskin Alexander Vasilievich**  
Orel State University named after  
I.S. Turgenev, Orel, Russia  
Professor of the Department  
«Information systems and digital  
technologies».  
Russia, Orel, Komsomolskaya St., 95  
8 (4862) 41-98-37  
E-mail: koskin@oreluniver.ru

**Dunaev Andrey Valerievich**  
Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia  
Professor of the Department «Instrument Engineering, Metrology and  
Certification»  
Leading researcher of Research & Development Center of Biomedical  
Photonics  
Russia, Orel, Komsomolskaya St., 95  
8 (4862) 41-98-06  
E-mail: dunaev@bmecenter.ru

© В.Е. Паршакова, Е.В. Жарких, Ю.И. Локтионова, А.В. Коськин, А.В. Дунаев, 2024

# **КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА, ИСПЫТАНИЯ** **И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ**

УДК 621.9.08

DOI: 10.33979/2073-7408-2024-364-2-177-181

М.В. УШАКОВ, И.А. ВОРОБЬЕВ, С.М. НИКОЛЬСКИЙ

## **СТРАТЕГИЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС НА КИМ**

**Аннотация.** В настоящей статье представлен общий подход к контролю зубчатых колес на КИМ. Рассмотрены основные контролируемые геометрические параметры зубчатых колес в соответствии с данными, приведенными в нормативной документации. Представлены погрешности параметров зубчатых колес, определяемых при измерениях на КИМ по ГОСТ 1643-81 и ГОСТ ISO 1328-1-2017. Выполнен анализ возможности контроля параметров зубчатых колес в зависимости от заявленных механических характеристик КИМ. Сделан вывод о возможности и целесообразности применения КИМ для контроля геометрических параметров зубчатых колес с учетом требований нормативно-технической документации. Определены требования к количеству контролируемых зубов зубчатого колеса и их расположению. Проведен анализ количества измеряемых точек и примерных траекторий перемещения устройства контроля при их измерении.

**Ключевые слова:** КИМ, ГОСТ, контроль, измерение, погрешность, количество измерений, допуск, зубчатое колесо.

### **Введение**

В современном машиностроении, не смотря на применение прогрессивных конструкций передаточных механизмов, использование регулируемых электродвигателей и т.п., все еще широкое применение находят механизмы, использующие зубчатое зацепление. Таким образом, их производство, а в особенности контроль являются актуальной задачей.

Рассматривая применение зубчатых колес в зависимости от их степени точности, можно сказать, что на долю общего машиностроения приходятся колеса 7-9 степени точности (передачи нормальной, пониженной и грубой степеней точности) [1].

Производство данных колес, в основном, происходит с использованием методов, предусматривающих массовое производство продукции, а, следовательно, и контроль данного вида продукции должен быть выборочным и не занимать много времени [2].

В качестве универсального средства измерения (СИ) используемого для контроля параметров зубчатого колеса можно рассматривать координатно-измерительные машины (КИМ) [3, 4]. Согласно «ГОСТ 8.051-81 (СТ СЭВ 303-76) Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Погрешности, допускаемые при измерении линейных размеров до 500 мм» погрешность СИ, должна быть около 30% от допуска на контролируемый параметр, чему современные КИМ полностью соответствуют.

### **Основная часть**

Для предварительной оценки объема измерений, необходимых для построения адекватной модели, нужно рассмотреть требования нормативной документации, предъявляемые к зубчатым колесам указанного выше диапазона степеней точности [3, 5].

К сожалению, одновременное действие ГОСТ ISO 1328-1-2017 «Передачи зубчатые цилиндрические. Система ISO. Классификация допусков на боковые поверхности зубьев. Часть 1. Определения и допускаемые значения отклонений на боковые поверхности зубьев зубчатого колеса» и ГОСТ 1643-81 «Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски» не позволяет создать полный универсальный перечень контролируемых параметров [6, 7], однако это никак не влияет непосредственно на процедуру измерения на КИМ.

Далее, в зависимости от партии изготавливаемых изделий, можно рассчитать объем выборки, обратившись к ГОСТ Р 50779.71-99 «Процедуры выборочного контроля по альтернативному признаку».

Например, условно приняв объем партии от 500 до 1200 шт., объем выборки при нормальном уровне контроля будет составлять 80 шт., а браковочное число при *AQL* (приемлемый уровень качества), равным около 5%, составит 2-3 единицы продукции.

Следующим этапом является определение стратегии измерения непосредственно боковой поверхности зубов зубчатого колеса.

Однако *ГОСТ 1643-81* конкретных требований по данному вопросу не имеет т.к. не предусматривает использование КИМ, а после анализа требований *ГОСТ ISO 1328-1-2017* можно сделать вывод, что для создания универсальной процедуры, требуется измерение всех зубов зубчатого колеса.

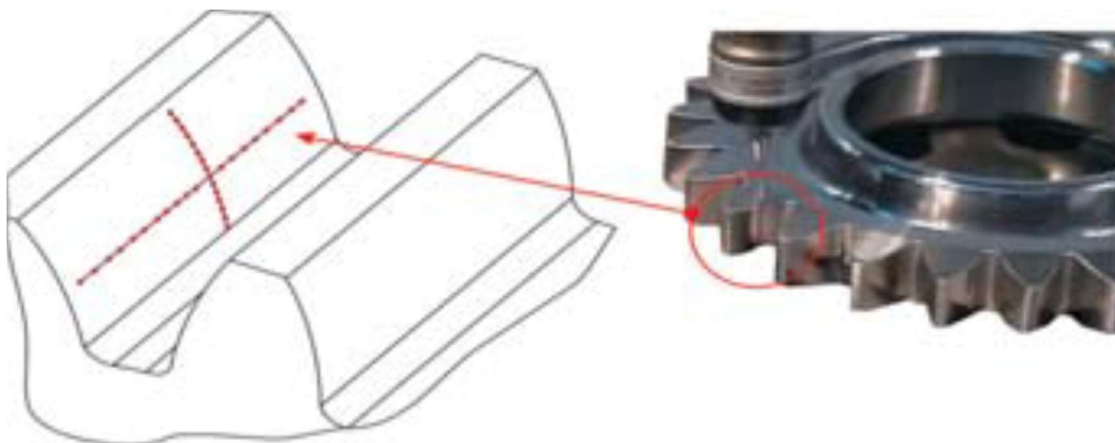


Рисунок 1 – Стандартная стратегия измерения боковой поверхности зуба по ISO [3].

Сложнее определить необходимое количество точек измерения и их расположение на боковой поверхности зуба. *ГОСТ ISO 1328-1-2017* рекомендует брать не менее 150 точек на длину траектории обката, что легко выполнимо для КИМ оснащенных сканирующим датчиком и не целесообразно из-за повышенной сложности программирования, связанной с малыми расстояниями перемещения датчика, сравнимыми с разрешающей способностью приводов перемещения, для машин, оснащенных дискретными датчиками. Так же следует заметить, что длина измеряемого участка в этом случае должна быть не менее 4 мм, иначе величина шага сканирования становится сравнимой с погрешностью измерения.

Расположение точек на поверхности зуба также может быть различно. Частично их распределение на боковой поверхности зуба описывается стандартами серии ISO. Единственным обязательным требованием является проведение контроля вдоль всей боковой поверхности зуба, участвующей в зацеплении (рисунок 1).

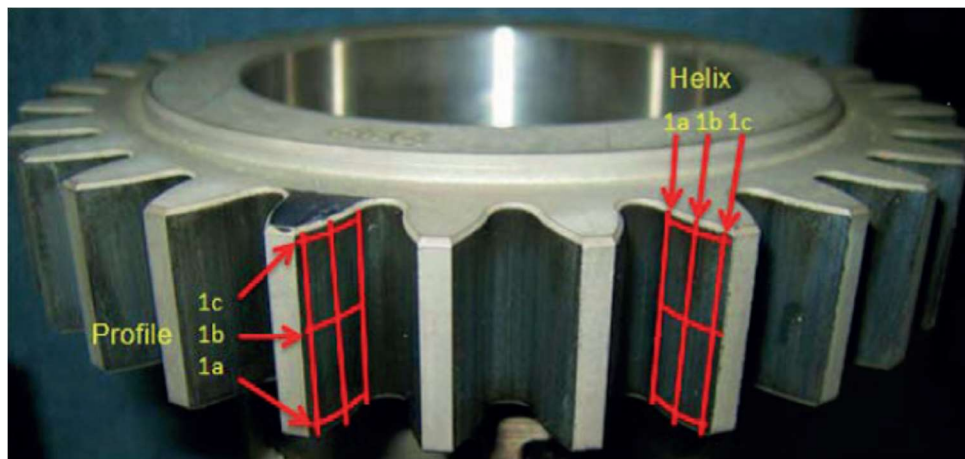


Рисунок 2 – Расположение линий контроля на боковых поверхностях зуба при исследовательских измерениях по стандартам серии ISO [4].

Этих измерений однозначно будет достаточно для проведения контроля большинства стандартных показателей точности, указываемых на чертежах зубчатых колес. Однако, для проведения аналитических измерений, рекомендуется [4] контролировать дополнительно еще как минимум начальные и конечные зоны зацепления (рисунок 2).

В связи с этим предлагается контролировать на боковой поверхности зубчатого колеса в одном сечении от 6 до 12 точек. Минимальное количество обусловлено тем, что эвольвента является кривой 2-го порядка, а согласно теореме единственности для кривых второго порядка [8], можно сказать что для определения формы боковой поверхности зуба необходимо провести измерение как минимум 6 точек с каждой стороны зуба в каждом исследуемом сечении (5 точек для однозначного определения эвольвенты, но как минимум 6 для избавления от статистической неопределенности). Верхний предел определяется в зависимости от длины контролируемого участка, перечня измеряемых параметров и дискретностью шага привода КИМ. В продольном направлении необходимо контролировать не менее 3 сечений [4], а при проведении исследовательских работ не менее 5 во избежание попадания в следы обработки, так как большинство колес обрабатывается методом зубофрезерования.

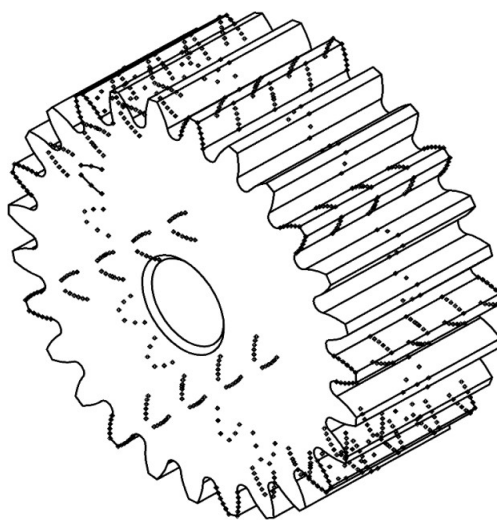


Рисунок 3 – Примерное расположение точек контроля на зубчатом колесе

Однозначно в отечественной нормативной документации не определено, следует ли подробно контролировать каждый зуб или достаточно одного, принимаемого за базовый, по которому форма и расположение эвольвенты проецируется на остальные зубья [3], которые контролируются в упрощенном режиме. *ГОСТ ISO 1328-1-2017* регламентирует количество зубцов, подлежащих исследованию при контроле различных параметров зубчатого колеса. Однако такой подход не применим при создании универсальной стратегии измерения. Поэтому предлагается использовать методику, описанную в [9, 10], в соответствии с которой предлагается проводить контроль всех зубцов, из которых не менее 4 измерять подробно (т.е. минимум 6 точек в сечении на эвольвентном профиле и не менее чем в 5 направлениях вдоль зуба) (рисунок 3).

Набор контролируемых параметров должен соответствовать требованиям чертежа изделия, что в большинстве случаев предполагает следующий набор параметров:

1. Радиальное биение зубчатого венца ( $F_r$ );
2. Колебание длины общей нормали ( $F_u w$ );
3. Отклонение шага ( $f_{pt}$ );
4. Накопленная погрешность шага колеса ( $F_p$ );
5. Погрешность профиля зуба ( $f_f$ );
6. Погрешность направления зуба ( $F_B$ )

Расположение минимального количества контролируемых зубцов (3 шт.) равномерно через  $120^\circ$  предполагает измерение параметров, связанных с кинематическими



погрешностями, однако их количество недостаточно для однозначного определения, например, радиального биения, для которого необходимо как минимум 4 точки измерения (3 точки определяют окружность без отклонения формы).

Контроль длины общей нормали предполагает измерение пары соседних либо лежащих через 3-4 один от другого зубов как минимум в трех разных зонах, что в сумме требует контроля не менее 6 зубов. То же самое относится и к контролю погрешностей шага зацепления.

Все вышеперечисленное дает нам в сумме 9 зубов для подробного контроля: 3 из которых расположены через 120°, по 2 зуба, отнесенных от стартового на 1 зуб для контроля погрешности шага, и 3-4 – для контроля длины общей нормали в зависимости от диаметра и модуля зубчатого колеса.

Для остальных зубов достаточно измерения по одной точке с каждой стороны профиля с целью определения его принадлежности к базовому эвольвентному.

### **Заключение**

Проведенное исследование позволяет создать единую стратегию проведения контроля зубчатого колеса на КИМ, достаточную для того чтобы делать выводы о соответствии измеряемого изделия требованиям как стандарта *ГОСТ 1643-81*, так и *ГОСТ ISO 1328-1-2017*, т.е. использовать одинаковый набор измеренных точек для контроля как комплексных показателей точности, так и единичных.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Детали машин: Учебник для вузов / Л. А. Андриенко [и др.]; под ред. О.А. Ряховского. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 544с.
2. Никольский С.М. Расчет экономической эффективности эксплуатации координатно-измерительной машины. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. №9. С. 601-603.
3. Сурков И.В., Мягкова М.В. Координатные измерения линейно-угловых параметров зубчатых колес // Оборудование и инструмент. Металлообработка. 2007. №6. С. 2-6.
4. ISO/TR 10064-1:2019 Code of inspection practice. Part 1: Measurement of cylindrical gear tooth flanks.
5. Абрамчук, М. В. Сравнение табличных значений параметров точности зубчатых колес и передач в стандартах: ISO 1328 и ГОСТ 1643-81 / М. В. Абрамчук, Б. П. Тимофеев // Теория механизмов и машин. - 2007. - Т. 5, № 1 (9). - С. 60-70.
6. Тимофеев Б.П Комбинирование норм точности в стандартах зубчатых передач / Тимофеев Б.П., Новиков Д. // Стандарты и качество. 2013. № 5. С. 48-52.
7. Абрамчук М.В. Перспектива стандартизации параметров точности зубчатых колес и передач. К разработке нового отечественного стандарта, учитывающего рекомендации ISO / Абрамчук М.В., Тимофеев Б.П. // Металлообработка. 2013. № 1 (73). С. 33-37.
8. Привалов, И.И. Аналитическая геометрия: учебник для вузов / И.И. Привалов. 35-е изд., стер. СПб. и др.: Лань, 2005. 304с.
9. Ушаков М.В Рекомендации по разработке методики контроля зубчатых колес на КИМ / Ушаков М.В., Воробьев И.А., Никольский С.М // Контроль. Диагностика. 2022, Т. 25, № 9 (291). С. 46-51.
10. Ушаков М.В Алгоритмизация процесса обработки измерительной информации при контроле зубчатых колёс на координатно-измерительных машинах / Ушаков М.В., Воробьев И.А., Никольский С.М. // Альманах современной метрологии. 2022. № 3 (31). С. 154-159.

**Ушаков Михаил Витальевич**  
ФГБОУ ВО «Тульский  
государственный университет», г.  
Тула  
Доктор технических наук,  
профессор, профессор кафедры  
«Инструментальные и  
метрологические системы»  
300012, г. Тула, пр. Ленина, д.92  
+7 (4872) 25-46-38  
tulaumv@yandex.ru

**Воробьев Илья Александрович**  
ФГБОУ ВО «Тульский  
государственный университет», г.  
Тула  
Кандидат технических наук,  
доцент, доцент кафедры  
«Инструментальные и  
метрологические системы»  
300012, г. Тула, пр. Ленина, д.92  
+7 (4872) 25-46-38  
imsilya@mail.ru

**Никольский Сергей Михайлович**  
АО «АК «Туламашзавод», г. Тула  
Инженер по метрологии  
300002, Россия, г. Тула, ул.  
Мосина, д. 2  
+7 (4872) 25-46-38  
nikolsky.serge@yandex.ru

M.V. USHAKOV, I.A. VOROBYOV, S.M. NIKOLSKY

## THE STRATEGY OF CONTROLLING THE PARAMETERS OF GEARS ON THE CMM

**Abstract.** *This article presents a general approach to gear control on CMM. The main controlled geometric parameters of gears are considered in accordance with the data provided in the regulatory documentation. The errors of the gear parameters determined during measurements on the CMM according to GOST 1643-81 and GOST ISO 1328-1-2017 are presented. The analysis of the possibility of controlling the parameters of gears depending on the declared mechanical characteristics of the CMM is performed. The conclusion is made about the possibility and expediency of using CMM to control the geometric parameters of gears, taking into account the requirements of regulatory and technical documentation. The requirements for the number of controlled teeth of the gear and their location are determined. The analysis of the number of measured points and approximate trajectories of movement of the control device during their measurement is carried out.*

**Keywords:** CMM, GOST, control, measurement, error, number of measurements, tolerance, gear wheel.

### BIBLIOGRAPHY

1. Machine parts: Textbook for universities / L. A. Andrienko [et al.]; edited by O.A. Ryakhovsky. M.: Bauman Moscow State Technical University, 2002. 544s.
2. Nikolsky S.M. Calculation of the economic efficiency of operation of a coordinate measuring machine. // Proceedings of Tula State University. Technical sciences. 2022. No.9. pp. 601-603.
3. Surkov I.V., Myagkova M.V. Coordinate measurements of linear angular parameters of gears // Equipment and tools. Metalworking. 2007. No.6. pp. 2-6.
4. ISO/TR 10064-1:2019 Code of inspection practice. Part 1: Measurement of cylindrical gear tooth flanks.
5. Abramchuk, M. V. Comparison of tabular values of precision parameters of gears and gears in the standards: ISO 1328 and GOST 1643-81 / M. V. Abramchuk, B. P. Timofeev // Theory of mechanisms and machines. - 2007. - Vol. 5, No. 1 (9). - pp. 60-70.
6. Timofeev B.P. Combining accuracy standards in gear transmission standards / Timofeev B.P., Novikov D. // Standards and quality. 2013. No. 5. pp. 48-52.
7. Abramchuk M.V. The prospect of standardization of precision parameters of gears and gears. Towards the development of a new domestic standard that takes into account ISO recommendations / Abramchuk M.V., Timofeev B.P. // Metalloobrabotka. 2013. No. 1 (73). pp. 33-37.
8. Privalov, I.I. Analytical geometry: textbook for universities / I.I. Privalov. 35th ed., St. Petersburg, et al.: Lan, 2005. 304s.
9. Ushakov M. In Recommendations for the development of a method for controlling gears on KIM / Ushakov M.V., Vorobyov I.A., Nikolsky S.M. // Control. Diagnostics. 2022, vol. 25, No. 9 (291). pp. 46-51.
10. Ushakov M.V. Algorithmization of the process of processing measuring information when controlling gears on coordinate measuring machines / Ushakov M.V., Vorobyov I.A., Nikolsky S.M. // Almanac of modern metrology. 2022. No. 3 (31). pp. 154-159.

#### Ushakov Mikhail Vitalievich

Tula State University, Tula  
Doctor of Technical Sciences,  
Professor, Professor of the  
Department of Instrumental and  
Metrological Systems  
92 Lenin Ave., Tula, 300012  
+7 (4872) 25-46-38  
tulaumv@yandex.ru

#### Vorobyov Ilya Alexandrovich

Tula State University, Tula  
Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor, Associate  
Professor of the Department of  
Instrumental and Metrological  
Systems  
92 Lenin Ave., Tula, 300012  
+7 (4872) 25-46-38  
imsilya@mail.ru

#### Nikolsky Sergey Mikhailovich

JSC "AK "Tulamashzavod", Tula  
Metrology Engineer  
300002, Tula, Russia, Mosina str., 2  
+7 (4872) 25-46-38  
nikolsky.serge@yandex.ru

© М.В. Ушаков, И.А. Воробьев, С.М. Никольский, 2024

Н.В. ДАВЫДОВА, Ю.Н. ИВАНОВ, Н.А. ОДИНЦОВ, В.И. ПАЛЕЕВ

## ПРЕДЛОЖЕНИЕ ПО УКОМПЛЕКТОВАНИЮ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ С УЧЁТОМ ФАКТОРОВ УКАЗЫВАЮЩИХ НА НЕСАНКЦИОНИРОВАННЫЙ ДОСТУП К ДАННЫМ

**Аннотация.** В статье представлен подход к выбору измерительного рефлектометрического оборудования для укомплектования автоматизированной системы контроля состояния волоконно-оптической линии связи (ВОЛС) на основе анализа технических характеристик средств измерений и с учётом факторов, указывающих на несанкционированный доступ к данным. Рассмотрена возможность архитектурного построения системы автоматизированного контроля ВОЛС на базе выбранного измерительного оборудования.

**Ключевые слова:** волоконно-оптическая линия связи, автоматизированная система контроля, современные рефлектометры, технические характеристики, показатели несанкционированного доступа к данным (НСД).

### Введение

Оптические сети в России сегодня строятся в крупных и малых населенных пунктах. При этом используются различные технологии их построения и организации. Технология PON (пассивная оптическая сеть) является среди прочих наиболее перспективной и быстрорастущей для предоставления широкополосного мультисервисного абонентского доступа, поэтому наибольшую популярность и востребованность имеет в сфере предоставления телекоммуникационных услуг для физических клиентов. Принцип работы технологии заключается в том, что между операторским оборудованием и абонентским терминалом организуется полностью пассивная оптическая сеть на основе одного одномодового волокна по топологии звезда, дерево или шина. Любые оптические сети, в том числе и выполненные по технологии PON, при эксплуатации требуют бесперебойного технического обслуживания. Необходимо уметь своевременно находить и диагностировать в них проблемы [1-6].

### Основная часть

Основным рабочим инструментом при диагностике ВОЛС выступают современные автоматизированные системы контроля (мониторинга). К системам мониторинга ВОЛС с точки зрения их качества предъявляются различные требования. В некотором смысле эти требования могут рассматривать как совокупность единичных и комплексных показателей качества [7]. Среди которых рассматриваются следующие:

1. Возможность диагностировать по активному и пассивному оптическому волокну.
2. Тип используемого рефлектометра с точки зрения его технических возможностей.
3. Время в течении которого устанавливается место неисправности волокна.
4. Расстояние, на котором можно обнаружить неисправность.
5. Возможность модульной организации системы мониторинга.
6. Соответствие требованиям по импортозамещению.
7. Возможность автономной работы модулей и узлов системы.
8. Возможность интегрирования в общую систему управления ВОЛС.
9. Возможность метрологического обеспечения измерительного оборудования.
10. Надёжность системы мониторинга.
11. Безопасность в работе.
12. Стоимость системы мониторинга.
13. Удобство интерфейса системы мониторинга.
14. Возможность сохранять данные мониторинга.
15. Расширяемость и масштабируемость.
16. Возможность идентифицировать НСД.

В настоящее время в связи с участвовавшими случаями промышленного шпионажа, угрозами террористических актов и хакерских атак среди всего множества показателей качества систем мониторинга, показатели характеризующее пригодность системы

мониторинга в части обеспечения информационной безопасности являются особенно важными. В частности, такой комплексный показатель качества системы мониторинга как «Возможность идентифицировать НСД», поэтому важно объективно оценивать его при выборе системы мониторинга, учитывая, что его оптимальное значение может определяться различными причинами [1, 8-10].

Известно, что существенно на показатель системы мониторинга «возможность идентифицировать НСД» влияют факторы, обусловленные используемым оборудованием (оптические рефлектометры, коммутаторы и т.п.) и их техническими возможностями, обусловленные соответственно техническими характеристиками этих устройств. Также на процесс идентификации НСД может влиять состояние и доступность оптического кабеля и прочие причины.

При этом для идентификации факта несанкционированного доступа могут использоваться различные параметры, определяемые системой мониторинга, и полученные на их основе критерии для величин затухания, потерь оптической мощности, радиуса кривизны оптоволоконного кабеля и обнаруженного макроизгиба.

В частности, известны признаки, которые по макроизгибу непременно указывают на НСД:

- время возникновения макроизгиба (оно не будет совпадать с временем проведенных регламентных работ);
- макроизгиб возник на участке, где работы по техническому обслуживанию не проводились
- величина прироста затухания динамически меняется в течении времени.

Хотя при этом надо учитывать также, что возникновение макроизгиба также имеет место быть и по причинам, не связанным с НСД (воздействие окружающей среды, неправильно проведенное техническое обслуживание и т.д.).

Не останавливаясь подробно на каждом из указанных факторов, отметим лишь то, что для идентификации факта несанкционированного доступа по любому из критериев важно в составе системы мониторинга иметь измерительное оборудование не только с улучшенными техническими характеристиками, но и нормированными метрологическими характеристиками для целей своевременного обнаружения НСД [1,10].

Известно, что большинство современных систем мониторинга ВОЛС построены на базе оптического рефлектометра, хотя могут использоваться также и измерители мощности оптического излучения. Однако с целью обнаружения макроизгибов наиболее распространенными являются именно системы мониторинга на базе оптических рефлектометров. Так как системы мониторинга на базе измерителей мощности оптического сигнала не позволяют установить причину и место, вызвавшее рост затухания оптического излучения [1,4].

Поэтому, для получения адекватной информации о параметрах макроизгиба (о месте его локализации) необходимо правильно подойти к выбору соответствующего по техническим характеристикам оптического рефлектометра и учесть все возможные особенности и условия проведения самого мониторинга. Стоит определиться с типом оптического волокна, которое будет диагностироваться, его максимальной протяженностью и соответственно рабочими длинами волн. При этом необходимо учитывать, что каждая новая длина волны – это дополнительный лазер в конструкции прибора, что влечёт за собой не только конструктивную избыточность, но и существенное повышение стоимости.

Таким образом, для автоматизированной системы контроля оптоволоконного кабеля в сетях PON целесообразно выбирать рефлектометр, позволяющий проводить диагностику одномодового оптического волокна по возможности с большим количеством рабочих длин волн (не менее трёх) и техническими характеристиками, позволяющими лучшим образом идентифицировать НСД.

Для этого проанализировали технические характеристики типового оптического рефлектометра на предмет их прямого или косвенного влияния на обобщенный показатель «возможность идентифицировать НСД» системы автоматизированного контроля ВОЛС.

Оптические рефлектометры на сегодняшний день являются одними из самых востребованных приборов для диагностики и тестирования сетей и по праву являются основным функциональным элементом системы автоматического контроля ВОЛС. Работа

устройства основывается на обработке информации об отражённых световых импульсах, отправляемых рефлектометром в ВОЛС. Фотодетектор, измерив полученный импульс, формирует рефлектограмму, отражающую типы событий и их расположение.

Анализ рефлектограммы позволяет определить практически все необходимые параметры линии: погонное затухание волокна, потери мощности между двумя точками сети или потери на отдельных пассивных элементах, возвратные потери. Кроме того, рефлектограмма позволяет быстро и точно определять местоположение сплиттеров, соединений, обрывов волокна или других дефектов.

Известно, что основными характеристиками рефлектометра являются: рабочие длины волн, ширина и длительность зондирующего импульса, динамический диапазон, мёртвая зона, разрешающая способность, диапазон расстояний зондирования. Интересно проанализировать технические возможности типового рефлектометра в целях повышения точности определения места макрозгиба, и расширения возможностей по идентификации причин, вызвавших макроизгиб, в частности обусловленных НСД.

Обычно типовые рефлектометры проводят измерения на двух длинах волн (1310 и 1550 нм). Однако есть модели рефлектометров способные также работать на дополнительных длинах волн, например, на длине волны 1625 нм, что позволяет более чётко детектировать дефекты волокна (макроизгибы) и проводить диагностические измерения в рабочей сети без прерывания связи.

Ширина импульса – показатель, от которого во многом зависит и динамический диапазон, и мёртвая зона рефлектометра. Широкие импульсы позволяют снимать рефлектограмму с более длинных линий, но ухудшают детализацию измерений и увеличивают мёртвую зону. Короткие импульсы, наоборот, позволяют точно определить местоположение неоднородности, но на малых дистанциях. Качественный рефлектометр, то есть способный хорошо идентифицировать макроизгиб должен быть способен варьировать шириной импульса и генерировать импульсы шириной от 5 до 20000 нс.

Динамический диапазон также важнейшая техническая характеристика, влияющая на способность рефлектометра идентифицировать макроизгиб, определяет длину волокна, которую может просветить рефлектометр. Если стоит задача просветить небольшой участок сети, то достаточно рефлектометра с динамическим диапазоном примерно 30 дБ; если же надо просветить всё дерево PON целиком, то стоит выбирать рефлектометр с динамическим диапазоном не менее 35 дБ (лучше 38-40дБ). При этом динамический диапазон надо соотносить с шириной импульса, при которой он был измерен. И при равных динамических диапазонах выбирать стоит тот прибор, который имеет меньшую ширину импульса.

Мёртвая зона определяет время, в течение которого приёмник рефлектометра находится в состоянии насыщения («слепоты») и не способен корректно детектировать сигнал. Данная техническая характеристика косвенно влияет на способность рефлектометра идентифицировать макроизгиб, т.к. в первую очередь зависит от ширины импульса и мощности отражённого сигнала, а уже потом – от скорости стабилизации фотоприёмника. Выделяют два типа мёртвых зон: по событию и по затуханию. Мёртвая зона по событию – это минимальное расстояние между двумя отражающими неоднородностями волокна (например, двумя механическими соединениями), при котором рефлектометр ещё может детектировать каждую из неоднородностей отдельно. Приемлемое значение данного показателя – менее двух метров. Мёртвая зона по затуханию – минимальное расстояние после отражающей неоднородности, когда приёмник способен снова корректно измерять обратное рассеяние. Приемлемое значение – менее 10 метров. Влияние данной технической характеристики на способность рефлектометра обнаруживать макроизгиб может быть минимизировано за счёт использования нормализующей катушки, предназначенной для тестирования отрезка сети, находящегося в пределах «мёртвой» зоны затухания, возникающей после коннектора, подключённого к рефлектометру. Длина этого отрезка варьируется в диапазоне от двух до нескольких сотен метров.

Разрешающая способность и количество точек измерения – это технические характеристики, напрямую влияющие на способность идентифицировать макроизгиб. Эти два показателя определяют, насколько точно рефлектометр может определить местонахождение события (неоднородности) и какое максимальное количество событий (точек измерения) он

сможет сохранить у себя в памяти. Современные модели имеют разрешающую способность вплоть до 5 см и до 128000 и более точек измерения.

Очень полезным для обнаружения макроизгиба в рефлектометре является режим «Реального времени», позволяющий оператору в реальном масштабе времени наблюдать изменение рефлектограммы.

Представленный анализ технических характеристик типового рефлектометра показал, что от его технических возможностей во многом зависит точность определения места макроизгиба и соответственно возможность идентификации причины, вызвавшей макроизгиб. Это в свою очередь позволяет не только ускорить факт обнаружения НСД, но и уменьшить количество ложных срабатываний системы автоматизированного контроля ВОЛС по другим, не связанным с НСД причинам.

Таким образом на основе анализа технических характеристик оптического рефлектометра и выявления тех из них, которые прямо или косвенно влияют на показатель «Возможность идентифицировать несанкционированный доступ к данным (НСД)» системы мониторинга были установлены общие требования, представленные в таблице 1, которые целесообразно рассматривать как предпочтительные при выборе конкретного типа рефлектометра.

Таблица 1 – Требования, предъявляемые к техническим характеристикам оптического рефлектометра для обеспечения недопущения НСД на ВОЛС

	Техническая характеристика	Значение технической характеристики	Обоснование выбора
1	Рабочие длины волн, нм	850,1310,1550,1625	Чем больше, тем лучше. Желательно три и более длины волны.
2	Динамический диапазон, дБ	35-43	Чем больше, тем лучше. Позволяет просветить большую длину оптоволокну
3	Разрешающая способность	До 5 см	Чем меньше, тем лучше. Определяет точность нахождения неоднородности
4	Длительность зондирующего импульса, нс	5,10,30,100,300,1000, 3000, 10000	Чем больше, тем лучше
5	Ширина зондирующего импульса, нм	от 5 до 20000	Должна варьироваться. Выбирается в зависимости от длины тестируемого волокна
6	Мёртвая зона, м:		
	по затуханию	менее 10	Допустимо, но лучше меньше
	по событию	менее 2	Допустимо, но лучше меньше
7	Диапазон расстояний, км	0-200	Чем больше, тем лучше
8	Погрешность	$\pm (1\text{м}+0,05\%)$	Не менее

При этом важно учесть, что кроме соответствия основным техническим характеристикам, указанным в таблице 1, выбираемый рефлектометр для автоматизированной системы контроля параметров ВОЛС должен соответствовать и дополнительным требованиям, определяющим его быстродействие, надёжность, экономичность и метрологическую обеспеченность.

Таким образом, для получения достоверной информации о состоянии оптического кабеля, его макроизгибах и месте их локализации как следствий возможных фактов НСД необходимо обоснованно подходить к выбору оптического рефлектометра для системы автоматизированного контроля ВОЛС на основе анализа всех его характеристик и сформированных на их основе показателей приемлемости. При этом обязательно выбор

рефлектометра должен осуществляться в соответствии с требованиями федерального законодательства по обеспечению единства измерений [7,11].

Таблица 2 – Технические характеристики популярных моделей оптических рефлектометров отечественных производителей

Фото прибора, тип, производитель	Рабочие длины волн, нм	Динамический диапазон, дБ	Разрешающая способность, до см	Длительность зондирующего импульса, нс (варьируемость)	Мёртвая зона, затухание /событие, менее	Диапазон расстояний, км	Погрешность по затуханию, не более, $\pm$ дБ
 FOD 7005	850, 1310, 1550, 1625	35-40	5	5-10000 (8)	10/2	0-200	0,5
 FOD 7339	1310, 1550, 1625	35-40	5	10-20000 (13)	3,6/0,8	0-240	0,5
 VISAX-PRO A	1310, 1550	32-30	10	4- 20000 (9)	10/3	0-160	0,5
 VISA	1310, 1550	34-36	10	4 - 20000 (9)	6/2	0-160	0,5
 GAMMA LITE	1310, 1550	32-30	5	6- 20000 (13)	10/3	0-160	0,5
 GAMMA RM	1310, 1550, 1625	31-33	2,5	6-20000 (13)	7/3	0-200	0,5
 Топаз-9400	850, 1300, 1310, 1490, 1550, 1625	38-39	20	5-10000 (12)	4,5/0,8	0-250	0,4
 КИВИ-7233	1310, 1550, 1625	36-37	2,5	3-20000 (12)	3,5/0,5	0-400	0,3

Тем более что на сегодняшний день на рынке России присутствует масса оптических рефлектометров как всемирно известных брендов, так и отечественных производителей. Они



представлены в различных ценовых группах, имеют различные технические характеристики и наборы опций. Все они востребованы и имеют свою четко обозначенную нишу. Однако не все из них прошли регистрацию в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений и разрешены для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений.

В результате анализа парка оптических рефлектометров, прошедших регистрацию в Федеральной информационной системе «Аршин» Росстандарта за последние пять лет, было установлено, что рынок российского рефлектометрического оборудования представлен производителями разных стран: Россия, Китай, Германия, Дания, Япония, Бразилия, Швейцария, США, Великобритания, Беларусь. При этом на долю импортного производителя приходится более 64% от общего количества измерительного рефлектометрического оборудования, а на долю отечественного производителя порядка 36% оптических рефлектометров.

Не останавливаясь подробно из соображений импортозамещения на рассмотрении иностранных производителей далее анализу подвергались модели только российского производителя.

Применив метод попарного сравнения [7,12], из всего многообразия типоразмеров оптических рефлектометров наиболее популярных отечественных производителей для дальнейшего рассмотрения были отобраны модели оптических рефлектометров с лучшими техническими возможностями, представленные в таблице 2.

Из сформированной в таблице 1 совокупности альтернатив отечественного рефлектометрического измерительного оборудования, решили задачу выбора той альтернативы, которая лучше всего будет удовлетворять поставленной задаче повышения защищенности от НСД системы автоматизированного контроля ВОЛС, а также другим не связанным с НСД требованиям, определяющим в частности быстродействие, надежность, экономичность и метрологическую обеспеченность рефлектометра.

Для решения этой многокритериальной задачи использовали критерий Парето, что позволило прийти к базису различных типов оптических рефлектометров, отбросив варианты, уступающие по сформированным показателям.

Задача выбора была решена при использовании следующих показателей приемлемости:

$T$  – способность идентифицировать НСД (обобщенный показатель способности идентифицировать НСД) Чем больше по абсолютному значению, тем выше оценка.

$Q$  – быстродействие, то есть способность выполнять с необходимой скоростью обработку рефлектограмм (чем выше, тем выше оценка);

$L$  – метрологическая обеспеченность (чем выше, тем выше оценка);

$C$  – тип управления оптическим рефлектометром (дистанционное управление - оценка максимальна);

$G$  – надежность, то есть способность оптического рефлектометра сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров (чем выше, тем выше оценка);

$N$  – стоимость (экономическая обеспеченность) (чем ниже цена, тем выше оценка);

При этом искали такое решение, которое максимизировало бы все частные показатели приемлемости, которые для решаемой задачи выбора принимали бы следующий вид:

$$T(x) \rightarrow \max; Q(x) \rightarrow \max; L(x) \rightarrow \max; C(x) \rightarrow \max; G(x) \rightarrow \max; N(x) \rightarrow \max.$$

В данном случае выбор проводился для условий, при которых оптический рефлектометр должен обеспечивать максимальную способность идентифицировать НСД при тестировании оптоволокна не более 12 минут, при стоимости не более 500000 рублей. Показатель приемлемости метрологического обеспечения принимает значение ноль при отсутствии в реестре средств измерений Федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений, а далее устанавливается (в баллах, например, по пяти бальной шкале) в зависимости от затрат на метрологическое обеспечение. Чем ниже затраты на метрологическое обеспечение рефлектометра, тем выше оценка. Основными ограничениями при выборе типа рефлектометра, являются: надежность, которая должна составлять не менее 10000 ч безотказной работы. Показатель «возможность идентифицировать НСД»  $T$  будет определяться как комплексный показатель на основе расчёта по совокупности нормированных единичных показателей (технических характеристик

оптического рефлектометра, влияющих прямо или косвенно на возможность идентифицировать НСД, представленных в таблице 1).

Таким образом для расчёта обобщённого комплексного показателя «возможность идентифицировать НСД» технические характеристики, приведённые в таблице 1 принимали за «эталон качества», а реальные технические характеристики каждого из рассматриваемых типов оптических рефлектометров за «объект сравнения». Затем сформировав совокупность единичных показателей качества эталона и объекта (каждого из рассматриваемых типов рефлектометров), присвоив им конкретные количественные значения в соответствии с их техническим описанием или условные количественные значения по шкале порядка (в баллах), в случае сложности определения конкретного числового значения показателя качества, произвели расчёт значения обобщённого показателя «возможность идентифицировать НСД»  $T$  по формуле для среднего геометрического взвешенного:

$$\bar{T} = \left( \prod_{i=1}^n T_i^g \cdot i \right) \cdot \frac{1}{\sum_{i=1}^n g_i}, \quad (1)$$

где  $T_i^g$  – относительный единичный показатель, влияющий на способность идентифицировать НСД,

$g_i$  – весовой коэффициент  $i$  единичного показателя, влияющий на способность идентифицировать НСД.

Для других показателей приемлемости ( $Q$  – быстродействие,  $L$  – метрологическая обеспеченность,  $C$  – тип управления оптическим рефлектометром,  $G$  – надёжность,  $N$  – стоимость) аналогично были определены нормированные значения показателей, которые для рассматриваемых типов оптических рефлектометров представлены в таблице 3.

Затем для решения задачи выбора последовательно были использованы векторный и скалярный критерии. Векторный позволил отбросить заведомо худшие варианты, а скалярный критерий – получить единственное решение из меньшего количества вариантов, то есть выбрать лучший тип рефлектометра.

Для решения задачи выбора использован критерий Байеса – Лапласа  $E_{об}$ , который выражается формулой:

$$E_{об} = \left( \sum_{i=1}^M a_i k_i \right); \sum_{i=1}^M a_i = 1; a_i \geq 0, \overline{i=1, M}, \quad (2)$$

где  $a_i$  – весовые коэффициенты соответствующих показателей приемлемости;

$k_i$  – нормированное значение показателя приемлемости.

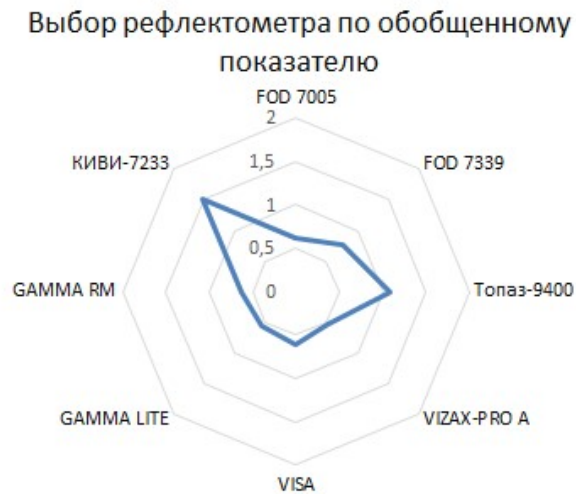
Затем из полученных значений показателей выбора для каждой из альтернатив выбрали максимальное значение и соответствующий этой альтернативе тип рефлектометра.

В соответствии с рассчитанными значениями обобщённых показателей выбора и представленной на рисунке 2 диаграммой оптимальным для автоматизированной системы контроля ВОЛС оказался рефлектометр типа КИВИ-7233 производителя ООО «КивиТех» г. Москва.

Таблица 3 – Нормированные значения показателей приемлемости оптического рефлектометра

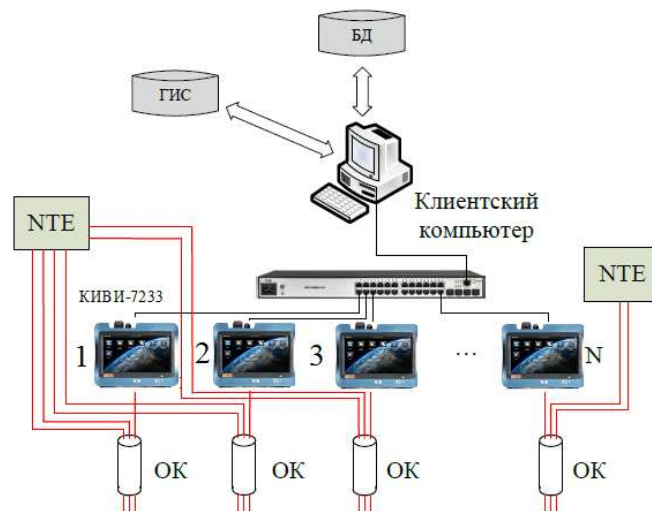
Показатель	FOD 7005	FOD 7339	Топаз-9400	VIZA X-PRO A	VISA	GAMMA LITE	GAMMA RM	КИВИ-7233
$T$	0,61	0,77	1,09	0,52	0,59	0,54	0,63	1,51
$Q$	1,74	1,73	1,74	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73
$L$	1,39	1,39	1,73	1,73	1,73	1,04	0	1,73
$C$	0,91	1,22	1,52	0,91	0,91	0,61	0,61	1,52
$G$	1,39	1,74	1,74	1,74	1,39	1,39	1,39	1,74
$N$	0,87	0,87	1,087	0,65	0,65	0,43	1,09	1,09
$E_{об}$	8,54	7,73	<b>8,92</b>	7,30	7,02	5,76	5,46	<b>9,34</b>

Диаграмма, поясняющая выбор определённого типа рефлектометра среди прочих альтернатив представлена на рисунке 1.



*Рисунок 1 – Диаграмма выбора рефлектометра среди прочих альтернатив*

Предложение по архитектурному построению автоматизированной системы контроля состояния ВОЛС на базе оптического рефлектометра типа КИВИ-7233 может быть реализовано как показано на рисунке 2.



*ГИС – геоинформационная система, БД- базы данных, ОК – оптический кабель, NTE- система передачи*

*Рисунок 2 – Общий вид архитектуры построения автоматизированной системы контроля состояния ВОЛС на базе рефлектометра КИВИ- 7233*

Рефлектометр КИВИ-7233 имеет дополнительные рабочие длины волн, которые отличны от тех что используются при передаче данных и их можно использовать для тестирования. Учитывая, что в случае с обнаружением НСД необходима детальная диагностика ВОЛС и её паспортизация, поэтому важным дополнением является большой динамический диапазон рефлектометра с малыми мертвыми зонами, а также хорошее программное обеспечение для обработки рефлектограмм и формирования отчета. При этом размер и вес рефлектометра невелики и составляют около полутора килограмма, поэтому таким оборудованием можно укомплектовать мобильную бригаду. К тому же прибор выполнен во влагозащищенном корпусе и имеет широкий диапазон рабочих температур. Минимальное время работы на одной зарядке батарей не менее 8 часов. Важным параметром является возможность расширения функциональных возможностей и обновления программного обеспечения рефлектометра в процессе эксплуатации, что делает данное решение более выгодным приобретением в долгосрочной перспективе.

### **Заключение**

Разработчики современных систем автоматизированного контроля стремятся к тому, чтобы круг решаемых системой задач не ограничивался набором общих и примитивных функций. Автоматизированная система должна не только контролировать состояние всего оптического кабеля, локализовать места повреждений, оповещать ответственных лиц о любых неисправностях на линии, но и обеспечивать защиту информационного оптического волокна от НСД. А это во многом обусловлено функциональностью используемого в автоматизированной системе измерительного оборудования. Без качественного оптического рефлектометра, выбранного по всем установленным показателям приемлемости, невозможно на сегодняшний день создать надежно работающую ВОЛС. Поэтому решение этой проблемы первоначально сводится к разработке методик правильного выбора рефлектометрического оборудования с учётом его технических возможностей и последующим определением наиболее подходящих методик тестирования. Только взвешенная оценка необходимых функциональных и технических возможностей позволит сэкономить бюджет и приобрести оптимальное средство измерений для решения поставленных задач, в частности по защищенности ВОЛС от НСД.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- 1 Булавкин И.А. Вопросы информационной безопасности сетей PON [Электронный ресурс] / URL: <http://web.snauka.ru/issues/2018/10/28072> (Дата обращения: 20.11.2022).
2. Власов И.И., Новиков Э.В., Птичников М.М., Сладких Д.В. Техническая диагностика современных цифровых сетей связи. Основные принципы и технические средства измерений параметров передачи для сетей PDH, SDH, IP, Ethernet и ATM [Текст] // Под ред. М.М. Птичникова. – М.: Горячая линия-Телеком, 2014. – 552 с.:ил
3. Карпов, М.А. Многоканальные волоконно-оптические телекоммуникационные системы [Текст] / М.А. Карпов, М.М. Абоелазм, В.Г. Зимин, Е.В. Егорова, О.Ю. Мамаева, А.Ю. Цуников // Успехи современной радиоэлектроники. – 2014. – №1. – С.55-59.
4. Субботин Е.А. Методы и средства измерения параметров оптических телекоммуникационных систем [Текст] // Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия-Телеком, 2014. – 224 с:ил.
5. Иванов А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения [Текст] // – М.: Компания САЙРУС СИСТЕМС, 1999.
6. Крухмалев В.В, Гордиенко В.Н, Моченов А.Д, Иванов В.И. Основы построения телекоммуникационных систем и сетей [Текст] // Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия- 2008 г.
7. Гродзенский С.Я. Управление качеством [Текст] //: учебник- 2 издание, перераб. и доп. –Москва: Проспект, 2018.-320 с.
8. Рахимов Н.Р. Рефлектометрический метод определения каналов утечки информации в волоконно-оптических линиях связи [Текст] // Сборник материалов VII Международного научного конгресса ГЕО-СИБИРЬ-2011.Т.4
9. Кулдашов О.Х. Способ защиты информации в ВОЛС на основе оптического зашумления [Текст] / О.Х. Кулдашов //Автоматика и программная инженерия– 2018. – №4(26) – С.113-118.
10. Корольков А.В., Кращенко И.А., Матюхин В.Г, Синев С.Г. Проблемы защиты информации, передаваемой по волоконно–оптическим линиям связи, от несанкционированного доступа [Электронный ресурс] / URL: <https://masters.donntu.ru/2018/fkita/cherniak/library/article3.htm> (Дата обращения: 14.02.2024).
11. Федеральный закон РФ «Об обеспечении единства измерений» N 102-ФЗ от 26 июня 2008 года (с изменениями на 11 июня 2021 года в редакции, действующей с 28 декабря 2021 года).
12. Давыдова Н.В. Методика и модель определения рациональной номенклатуры средств измерений для осуществления метрологического обеспечения современных цифровых систем, сетей и комплексов связи [Текст] / Н.В. Давыдова, Ю.Н. Иванов, Ю.А. Ремизов, В.О. Иванов //Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии – 2021– Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева. – 6 (350) – С.127-136.

**Давыдова Надежда Владимировна**  
Академия ФСО России  
Кандидат технических наук, доцент  
сотрудник,  
302034, г.Орел, ул. Приборостроительная, 35  
Тел. (4862)54-94-69  
E-mail: k23@academ.msk.rsnet.ru

**Одинцов Никита Андреевич**  
Академия ФСО России  
курсант,  
302034, г.Орел, ул. Приборостроительная, 35  
Тел. (4862)54-94-69  
E-mail: k23@academ.msk.rsnet.ru

**Иванов Юрий Николаевич**  
Академия ФСО России  
Кандидат технических наук, доцент,  
сотрудник,  
302034, г.Орел, ул. Приборостроительная, 35  
Тел. (4862)54-94-69  
E-mail: metrolog@academ.msk.rsnet.ru

**Палеев Владислав Игоревич**  
Академия ФСО России  
курсант,  
302034, г.Орел, ул. Приборостроительная, 35  
Тел. (4862)54-94-69  
E-mail: k23@academ.msk.rsnet.ru

N.V. DAVYDOVA, YU.N. IVANOV, N.A. ODINTSOV, V.I. PALEEV

## PROPOSAL TO COMPLETE THE AUTOMATED FIBER OPTIC LINK MONITORING SYSTEM WITH MEASURING EQUIPMENT TAKING INTO ACCOUNT FACTORS INDICATING UNAUTHORIZED ACCESS TO DATA

**Abstract.** *The article presents an approach to selecting measuring reflectometric equipment for equipping an automated system for monitoring the state of a fiber-optic communication line based on an analysis of the technical characteristics of measuring instruments and taking into account factors indicating unauthorized access to data. The possibility of architectural construction of the system of automated control of the fiber-optic fiber based on the selected measuring equipment is considered.*

**Keywords:** *fiber-optic communication line, automated control system, modern reflectometers, technical characteristics, indicators of unauthorized access to data.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Bulavkin I.A. Information security issues of PON networks [Electronic resource] /URL: <http://web.snauka.ru/issues/2018/10/28072> (Contact date: 20.11.2022).
2. Vlasov I.I., Novikov E.V., Pychinikov M.M., Sladkikh D.V. Technical diagnostics of modern digital communication networks. Basic principles and technical means of measuring transmission parameters for PDH, SDH, IP, Ethernet and ATM networks [Text]/Edited by M.M. Puchinikova. - M.: Hotline-Telecom, 2014. - 552 s.: sludge
3. Karpov, M.A. Multichannel fiber-optic telecommunication systems [Text ] /M.A. Karpov, M.M. Aboelasm, V.G. Zimin, E.V. Egorova, O.Yu. Mamaeva, A.Yu. Tsunikov//Successes of modern radio electronics. –2014. –№1. - S.55-59.
4. Subbotin E.A. Methods and means of measuring the parameters of optical telecommunication systems [Text]/Textbook for universities. - M.: Hotline-Telecom, 2014. - 224 s: silt.
5. Ivanov A.B. Fiber optics: components, transmission systems, measurements [Text] / - M.: CYRUS SYSTEMS, 1999.
6. Krukhmalev V.V., Gordienko V.N., Mochenov A.D., Ivanov V.I. [Text] / Fundamentals of telecommunications systems and networks construction. Hotline,. 2008
7. Grodzensky S.Ya. Quality management: textbook [Text] / - 2nd edition, prerab. And additional -Moskva: Prospect, 2018.-320 p.
8. Rakhimov N.R. Reflectometric method for determining information leakage channels in fiber-optic communication lines [Text] / Collection of materials of the VII International Scientific Congress GYeO-SIBIR-2011.T.4
9. Kuldashov O.Kh. Method of Information Protection in Fiber-Optic Network Based on Optical Noise [Text] /O.K. Kuldashov//Automation and Software Engineering - 2018. - No. 4 (26) - S.113-118.
10. Korolkov A.V., Krashchenko I.A., Matyukhin V.G., Sinev S.G. Problems of protecting information transmitted via fiber-optic communication lines from unauthorized access [Electronic resource ]/URL: <https://masters.donntu.ru/2018/fkita/cherniak/library/article3.htm> (Date of appeal: 14.02.2024).
11. Federal Law of the Russian Federation "On Ensuring the Uniformity of Measurements" N 102-FZ of June 26, 2008 (as amended on June 11, 2021, as amended from December 28, 2021)
12. Davydova N.V. Methodology and model for determining the rational nomenclature of measuring instruments for metrological support of modern digital systems, networks and communication complexes [Text] /N.V. Davydova, Yu.N. Ivanov, Yu.A. Remizov, V.O. Ivanov//Fundamental and applied problems of technology and technology - 2021-Eagle: OSU named after I.S. Turgeneva. - No. 6 (350) - S.127-136.

**Davydova Nadezhda Vladimirovna**  
Academy FSO of Russia  
Ph.D, docent,Staff,  
302034, Orel, Priborostroitel'naya, 35  
Ph. (4862)54-94-69  
E-mail: k23@academ.msk.rsnet.ru

**IvanovYriy Nicolaevich**  
Academy FSO of Russia  
Ph.D, docent,Staff,  
302034, Orel, Priborostroitel'naya, 35  
Tel. (4862)54-94-69  
E-mail: metrolog@academ.msk.rsnet.ru

**Paleev Vladislav Igorevich**  
Academy FSO of Russia  
cadet,  
302034, Orel, ul. Instrument, 35  
Tel. (4862)54-94-69  
E-mail:: k23@academ.msk.rsnet.ru

**Odintsov Nikita Andreevich**  
Academy FSO of Russia  
cadet,  
302034, Orel, Priborostroitel'naya, 35  
Tel. (4862)54-94-69  
E-mail:: k23@academ.msk.rsnet.ru

© Н.В. Давыдова, Ю.Н. Иванов, Н.А. Одинцов, В.И. Палеев, 2024

О.В. ФИЛИПОВИЧ, Н.А. БАЛАКИНА, А.И. БАЛАКИН

## МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДА АНАЛИЗА ВЛИЯНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ НА ПОКАЗАТЕЛИ СЕЛЕКТИВНОЙ СБОРКИ ДВУХ ЭЛЕМЕНТОВ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ МНОГОКРАТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

**Аннотация.** Рассматривается процесс однопараметрической селективной сборки двух элементов, образующих прецизионное соединение. Предполагается, что входные и выходные параметры изделия связаны известной линейной зависимостью. Приведена модель процесса в условиях неточных измерений и метод, позволяющий учесть влияние погрешностей измерения при сортировке элементов по селективным группам и определить показатели качества сборочного процесса. Одним из возможных вариантов повышения точности измерений и уменьшения влияния случайных ошибок являются многократные измерения. Произведена модификация модели и метода для случая применения многократных измерений при сортировке элементов на селективные группы. Приведен пример моделирования и зависимости вероятности формирования годных сборочных комплектов от числа измерений при различных предельных погрешностях. Выполнен анализ результатов, обозначены перспективы дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** селективная сборка, одновариантное комплектование, математическая модель, сортировка, погрешность измерения, многократные измерения.

### Введение

Рассматривается процесс селективного комплектования и сборки двух элементов, образующих прецизионное соединение по одному параметру. Предположим, что элементы изготавливаются независимо друг от друга, сборка производится по параметрам  $x_1$  и  $x_2$ , которые являются независимыми случайными величинами, имеющими плотности распределения  $f_{li}(x)$ . Выходной параметр  $y$  связан с исходными линейной зависимостью:

$$y = g(x_i) = \sum_{i=1}^2 \xi_i x_i, \quad (1)$$

коэффициенты  $\xi_i$  в которой являются известными и равны  $\pm 1$ .

Процесс селективной сборки можно разделить на несколько этапов, важнейшим из которых является сортировка элементов по группам. Сортировка сопряжена со стопроцентным контролем с погрешностями, появление которых приводит к тому, что вместо истинного значения параметра  $x_i$  становится известным значение  $z_i$ . В предположении, что все погрешности имеют только случайные составляющие, будем использовать аддитивную модель наблюдения [1]:

$$z_i = x_i + \delta_i, \quad i = \overline{1, 2}, \quad (2)$$

где  $\delta_i$  – случайная составляющая погрешности измерения параметра элемента  $i$  с плотностью распределения  $f_{2i}(\delta_i)$ .

Действительное значение параметра в случае независимости величин  $x_i$  и  $\delta_i$  имеет плотность распределения

$$f_{3i}(z_i) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{li}(x_i - k) f_{2i}(k) dk = f_{li}(x_i) * f_{2i}(\delta_i), \quad i = \overline{1, 2}, \quad (3)$$

где  $*$  – оператор свертки.

В результате сортировки по действительным значениям параметра  $z_i$  могут возникать ошибки в случае, когда элемент попадает в одну из соседних селективных групп вместо требуемой группы, куда он попал бы при сортировке по истинным значениям при  $\delta_i \rightarrow 0$ . Существующие модели процесса селективной сборки либо не учитывают влияние погрешностей измерения на результаты ошибочной сортировки [2-10], либо используют определенные допущения [11]. Аналитическая модель, позволяющая учесть влияние погрешности измерения на процесс сортировки, построена в [12]. Данная модель дает возможность вычислить общее количество сборочных комплектов (СК), однако она не

учитывает вероятные комбинации в условиях как групповой, так и межгрупповой взаимозаменяемости, вследствие которых могут появиться бракованные изделия. В работах [13,14] предложен метод, позволяющий произвести расчеты показателей качества сборочного процесса с учетом погрешностей измерения параметров, по которым производится сортировка, в частности, определить долю годных СК, выход годных из исходной совокупности элементов, а также вероятности образования предварительного брака и незавершенного производства.

Одним из методов, повышающих точность измерений и уменьшающих влияние случайных ошибок, является метод многократных измерений. Применение данного метода позволяет повысить точность измерения, не прибегая к более точным средствам контроля. Как известно из [1,15], при каждом повторном измерении дисперсия погрешности уменьшается в два раза. Недостатком данного метода является увеличение времени контроля, что в свою очередь приводит к уменьшению производительности. Обычно многократные измерения не применяются в процессе сортировки при селективной сборке. Однако, существуют варианты сборки прецизионных изделий, где возможно использовать данный метод. К таким вариантам, по мнению авторов, относится сборка узлов топливной и распределительной аппаратуры.

Целью данной работы является модификация метода анализа влияния погрешностей измерения на показатели селективной сборки двух элементов путем применения многократных измерений.

### Основная часть

Здесь и далее используемые обозначения будут соответствовать принятым в [12]. При одновариантном правиле комплектования годные СК из попавших в группы  $k_i$  ( $i = \overline{1,2}$ ) элементов могут образовываться сопряжением элементов из одноименных селективных групп (определяется правилом комплектования) или сопряжением элементов из других, не всегда смежных, селективных групп (определяется ошибками сортировки).

Метод, предложенный в [13,14], позволяет определить вероятности получения годных СК при практически любых комбинациях образующих его элементов и заключается в следующем.

1. Каждый интервал  $X_i^{(k_i)}$  ( $i = \overline{1,2}$ ) разделяют на  $n_i$  равных частей, образуя подгруппы  $X_i^{(d_i)}$  с допусками

$$Tx_i^{(d_i)} = \frac{Tx_i^{(k_i)}}{n_i} \quad (4)$$

и границами  $b_i^{(d_i)}$ , таким образом, что

$$X_i^{(d_i)} = \{x_i : b_i^{(d_i)} \leq x_i < b_i^{(d_i+1)}\}, d_i = \overline{1, l_i \times n_i - 1}. \quad (5)$$

2. Определяются вероятности попадания в селективные группы  $k_i$  элементов из подгрупп с учетом влияния погрешности измерения, аналогично подходу, приведенному в [12]:

$$P_i^{(d_i, k_i)} = \int_{b_i^{(d_i)}}^{b_i^{(d_i+1)}} f_{1i}(x_i) \int_{a_i^{(k_i)} - x_i}^{a_i^{(k_i+1)} - x_i} f_{2i}(\delta_i) d\delta_i dx_i, d_i = \overline{1, l_i \times n_i}, k_i = \overline{2, l_i - 1}, i = \overline{1, 2}. \quad (6)$$

3. Рассчитываются суммарные вероятности попадания в группы  $k_i$  из всех имеющихся подгрупп:

$$I_i^{(k_i)} = \sum_{j=1}^{l_i \times n_i} P_i^{(d_j, k_i)}, k_i = \overline{2, l_i - 1}; i = \overline{1, 2}. \quad (7)$$

4. Вычисляются вероятности получения годных сборочных комплектов из элементов обоих типов  $P_{ГСК}^{(d_1, d_2)}$ , параметры которых принадлежат подгруппам с номерами  $d_1$  и  $d_2$ :

$$P_{ГСК}^{(d_1, d_2)} = \begin{cases} 1, y \in [y_{\min}, y_{\max}] \\ 0, y \notin [y_{\min}, y_{\max}] \end{cases} \quad (8)$$

где  $y = g(x_i)$ ,  $x_i \in [b_i^{(d_i)}, b_i^{(d_i+1)}]$ ,  $d_i = \overline{1, l_i \times n_i}$ ,  $i = \overline{1, 2}$ .



5. Определяются вероятности образования годных сборочных комплектов из элементов, попавших в группы с номерами  $k_1$  и  $k_2$ :

$$I_{ГСК}^{(k_1, k_2)} = \frac{P_1^{(d_1, k_1)}}{I_1^{(k_1)}} \frac{P_2^{(d_2, k_2)}}{I_2^{(k_2)}} P_{ГСК}^{(d_1, d_2)} \min \{I_1^{(k_1)}, I_2^{(k_2)}\}, \quad d_i = \overline{1, l_i \times n_i}, \quad k_i = \overline{2, l_i - 1}, \quad i = \overline{1, 2}. \quad (9)$$

6. Суммарная вероятность образования годных сборочных комплектов по всем селективным группам:

$$I_{ГСК} = \sum_{k_i} I_{ГСК}^{(k_1, k_2)}, \quad i = \overline{1, 2}. \quad (10)$$

Отсюда можно определить показатели сборочного процесса [4]:

$$P_0 = I_{ГСК}, \quad P_1 = \frac{I_{ГСК}}{I_{СК}}. \quad (11)$$

Суммарная вероятность  $I_{ГСК}$  образования годных СК в том числе будет зависеть от точности измерений. Как было указано выше, для уменьшения погрешностей средств измерений предлагается использовать метод многократных измерений. При использовании данного метода необходимо определять число измерений, обеспечивающих заданную точность. Методика его определения приводится в [15]. Число измерений зависит от значения измеряемой величины, находящейся в пределах допуска. Для его определения необходимо знать плотность распределения случайной составляющей погрешности измерения, которая зависит от требуемого значения верности  $\varepsilon^2$ . Вид плотности распределения выбирается из условия обеспечения максимума дифференциальной энтропии указанной случайной величины, дисперсия которой равна  $\varepsilon^2$ . Далее по найденной плотности  $p(x)$  определяется вероятность выхода результата измерения за границу поля допуска и сравнивается с заданным значением доверительной вероятности. Если она больше, то  $\varepsilon^2$  уменьшается и вновь решается указанная задача. Процесс продолжается до тех пор, пока не будет выполнено указанное условие. После того, как  $\varepsilon^2$  найдено, определяется число многократных измерений:

$$n = \frac{\sigma_\delta^2}{\varepsilon^2}, \quad (12)$$

где  $\sigma_\delta^2$  – дисперсия случайной составляющей погрешности измерений [16,17].

Задача определения вида плотности распределения случайной погрешности измерения ставится следующим образом: определить плотность  $p(x)$ , доставляющую экстремум функционалу [15,18]

$$\max_{p(x)} \rightarrow \left\{ H_{\text{оуп}}(\xi) = - \int_{-\beta}^{\beta} p(x) \cdot \ln p(x) \, dx \right\} \quad (13)$$

при ограничениях

$$\int_{-\beta}^{\beta} p(x) \cdot x^2 \, dx = \varepsilon^2, \quad (14)$$

$$\int_{-\beta}^{\beta} p(x) \, dx = 1. \quad (15)$$

Уравнение Эйлера для данного функционала после преобразований имеет вид

$$-\ln p(x) - 1 + \lambda_1 + \lambda_2 x^2 = 0, \quad (16)$$

а его решением является

$$p(x) = e^{\lambda_1 - 1} e^{\lambda_2 x^2}. \quad (17)$$

Для нахождения множителей Лагранжа выражение для плотности распределения  $p(x)$  подставляется в систему ограничений, а далее эта система решается численно. Таким образом, модификация разработанной математической модели сборочного процесса состоит в том, что при заданных пределах погрешностей  $\Delta_{\text{lim}} = \beta$ , количества измерений  $n$  и величинах  $\sigma_\delta^2$

определяются функции  $p(x)$  и используются вместо  $f_{2i}(\delta_i)$ .

Приведем пример моделирования. Предположим, как и в [14], что элементами являются детали, образующие прецизионное соединение с зазором, а случайные величины  $x_i$  и  $\delta_i$  – гауссовские, имеющие распределения с параметрами соответственно  $m_{x_i}$ ,  $\sigma_{x_i}$  и  $m_{\delta_i}$ ,  $\sigma_{\delta_i}$  (математические ожидания и среднеквадратические отклонения). Расположение интервалов допусков показано на рисунке 1.

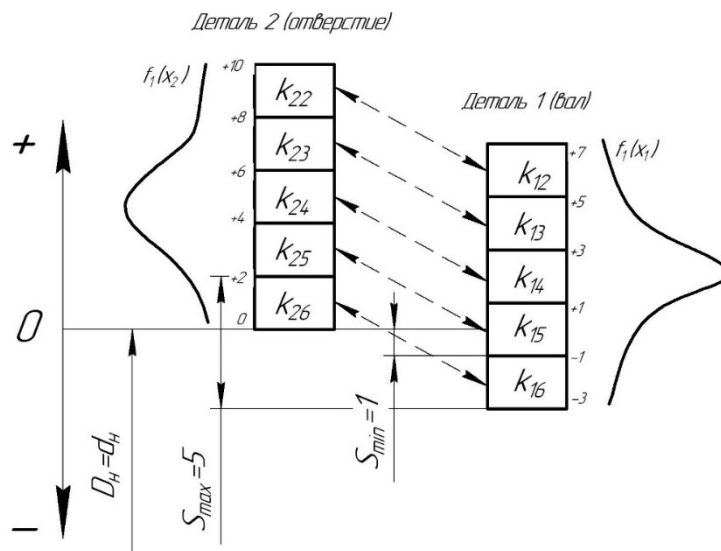


Рисунок 1 – Схема расположения интервалов допуска

Исходные данные для моделирования.

1. Значения расширенных допусков на изготовление  $Tx_1 = Tx_2 = 10$  мкм с координатами середин интервалов +2 мкм и +5 мкм. Общее количество селективных групп (включая брак)  $l_1 = l_2 = 7$ , групповые допуски равны друг другу.

2. Математические ожидания  $m_{x1} = 2$  мкм;  $m_{x2} = 5$  мкм;  $m_{\delta1} = m_{\delta2} = 0$  мкм; среднеквадратические отклонения  $\sigma_{x1} = 1,67$  мкм;  $\sigma_{x2} = 1,72$  мкм.

Диапазон допустимых зазоров:

$$S_{\min} \leq x_2 - x_1 \leq S_{\max}, \quad (18)$$

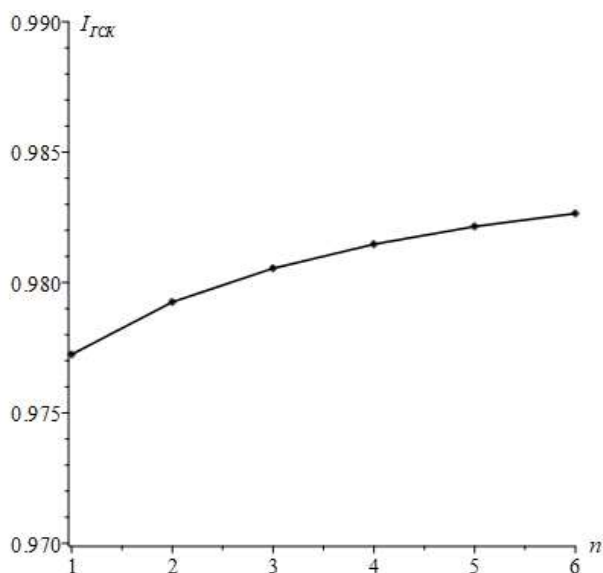
где  $S_{\min} = 1$  мкм,  $S_{\max} = 5$  мкм (см. рисунок 1).

3. Значения предельных погрешностей измерений зависят от величин групповых допусков в процентном отношении. Среднеквадратические отклонения случайных составляющих погрешностей измерения  $\sigma_{\delta_i}$  вычисляются как четверть этих значений.

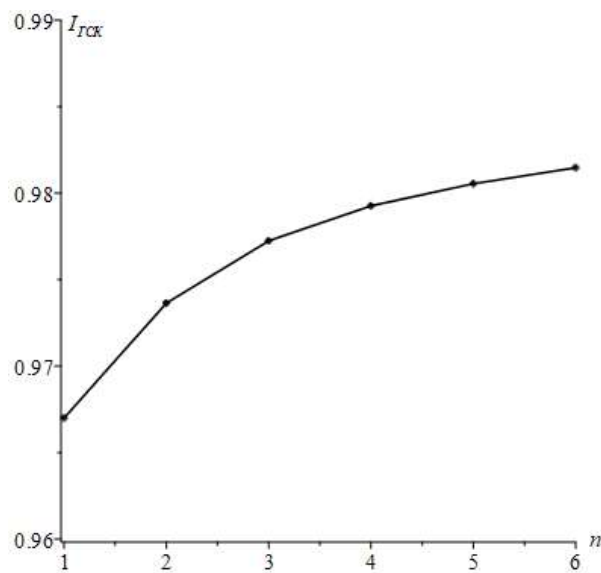
Зависимости вероятностей формирования годных сборочных комплектов от числа измерений при указанных выше параметрах и допустимой погрешности средств измерения равной 25%, 50%, 80% и 100% группового допуска приведены на рисунках 2–5 соответственно.

### Заключение

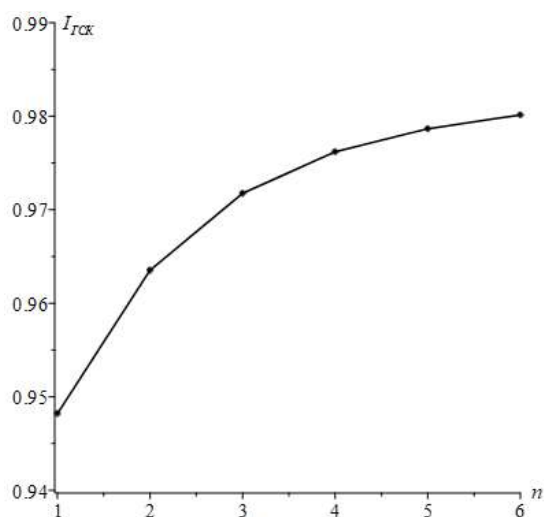
Использование многократных измерений при селективной сборке за счет уменьшения случайной составляющей погрешности увеличивает вероятность образования годных СК. Применение данного метода с одной стороны позволяет использовать более грубые (с точки зрения точностных характеристик) средства измерительной техники, а с другой – ведет к снижению производительности технологического процесса за счет увеличения времени измерения. Техничко-экономическая оценка контрольно-сортировочных операций при выполнении многократных измерений и решение сопутствующих оптимизационных задач являются перспективами дальнейших исследований.



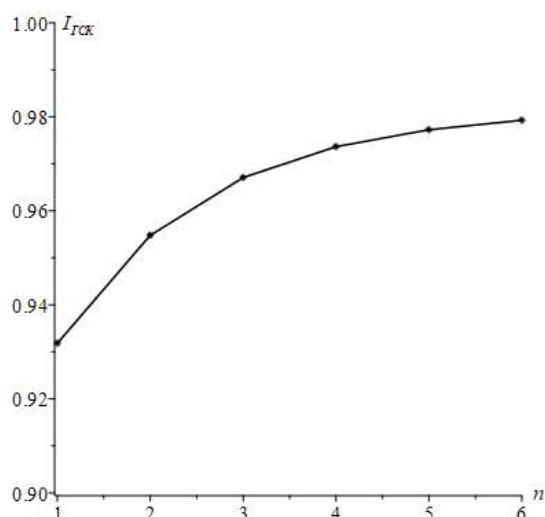
**Рисунок 2 – Зависимость вероятности формирования годных сборочных комплектов от числа измерений при предельной погрешности 0,5 мкм**



**Рисунок 3 – Зависимость вероятности формирования годных сборочных комплектов от числа измерений при предельной погрешности 1 мкм**



**Рисунок 4 – Зависимость вероятности формирования годных сборочных комплектов от числа измерений при предельной погрешности 1,6 мкм**



**Рисунок 5 – Зависимость вероятности формирования годных сборочных комплектов от числа измерений при предельной погрешности 2 мкм**

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новицкий П.В. Оценка погрешностей результатов измерений /П.В. Новицкий, И.А. Зограф. Изд.2-е перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, – 1991. – 304 с.
2. Бонч-Осмоловский М.А. Селективная сборка /М.А. Бонч-Осмоловский. – М.: Машиностроение, 1974. – 144с.
3. Буловский П.И. Автоматизация селективной сборки приборов /П.И. Буловский, Г.В. Крылов, В.А. Лопухин. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1978. – 232с.
4. Катковник В.Я. Основы теории селективной сборки /В.Я. Катковник, А.И. Савченко. – Л.: Политехника, 1991. – 303 с.
5. Филипович О.В. Модель процесса однопараметрической селективной сборки сложных изделий /О.В. Филипович, А.Г. Карлов, Н.А. Волошина //Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 5. – С. 398-403.
6. Kannan S.M. A new selective assembly model for achieving specified clearance in radial assembly /S.M. Kannan, G.R. Pandian //Materials Today: Proceedings, 2021. Volume 46, Part 17. pp. 7411-7417. DOI:10.1016/j.matpr.2020.12.1229.

7. Demir O.E. Function-based selective and adaptive cyber-physical assembly system for increased quality in optoelectronics industry /O.E. Demir, M. Colledani, R. Paoletti R. [etc.] //Computers in Industry, 2023. V.148. 103915. DOI:10.1016/j.compind.2023.103915.
8. Clottey T. Sharing Quality-Distribution Information for the Selective Assembly of Intermediary Components in the Automotive Industry /T. Clottey, Wc. Benton //Production and Operations Management, 2019. DOI:10.1111/poms.13094.
9. Thys Th. Selective assembly of planetary gear stages to improve load sharing /Th. Thys, W. Smet //Forschung im Ingenieurwesen, 2023. 87. pp. 1-9. DOI: 10.1007/s10010-023-00646-x.
10. Xing M. Optimization of Selective Assembly for Shafts and Holes Based on Relative Entropy and Dynamic Programming /M. Xing, Q. Zhang, X. Jin [etc.] //Entropy, 2020. 22. 1211. DOI: 10.3390/e22111211.
11. Кесоян А.Г. Исследование влияния погрешности измерения деталей на собираемость прецизионных соединений /А.Г. Кесоян, Л.А. Рабинович, Н.В. Кобзев //Известия Волгоградского государственного технического университета, 2009. – Т.5. – №8(56). – С. 92–98.
12. Филипович О.В. Определение количества комплектов при селективной сборке двух элементов с учетом влияния погрешности измерения /О.В. Филипович, Г.В. Невар, Н.А. Волошина, В.О. Филипович //Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2023. – № 3. – С. 105-109.
13. Филипович О.В. Модель процесса одновариантной однопараметрической селективной сборки двух элементов с учетом погрешностей измерения при их сортировке /О.В. Филипович //Автоматизация и измерения в машино- приборостроении. – 2023. – № 3(23). – С. 93-101.
14. Filipovich O. Method for taking into account measurement errors when sorting elements into selective groups /O. Filipovich, G. Nevar, N. Balakina [etc.] //International Russian Automation Conference (RusAutoCon 2023): Advances in Automation V, 2024. – PP. 174-182. DOI: 10.1007/978-3-031-51127-1\_17.
15. Энтропийный подход к анализу метрологических характеристик измерительных приборов в машино-приборостроении /В.Я. Копп, А.И. Балакин, А.А. Скидан [и др.]. – Севастополь: Крымский Издательский Дом, 2020. – 340 с.
16. Копп В.Я. Анализ применимости композиционного закона при измерениях в машино-приборостроении /В.Я. Копп, А.И. Балакин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2017. – № 4-1(324). – С. 23-36.
17. Копп В.Я. Анализ максимальной дифференциальной энтропии и дисперсии композиции случайных величин, сосредоточенных на конечных интервалах /В. Я. Копп, А. И. Балакин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2018. – № 4-2(330). – С. 9-18.
18. Копп В.Я. Возможность использования полиномиальной аппроксимации при анализе дифференциальной энтропии случайных величин, сосредоточенных на конечном интервале /В.Я. Копп, А.И. Балакин, Н.А. Балакина // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2019. – № 4-2(336). – С. 51-58.

**Филипович Олег Викторович**  
 ФГАОУ ВО «Севастопольский  
 государственный университет»,  
 г. Севастополь  
 Кандидат технических наук, доцент,  
 заведующий кафедрой «Приборные  
 системы и автоматизация  
 технологических процессов»  
 299053, г. Севастополь,  
 ул. Университетская, 33  
 +7 (8692) 41-77-41 добавочный 1090  
 E-mail: ophisl@yandex.ru

**Балакина Наталья Анатольевна**  
 ФГАОУ ВО «Севастопольский  
 государственный университет»,  
 г. Севастополь  
 Старший преподаватель, кафедры  
 «Приборные системы и автоматизация  
 технологических процессов»  
 299053, г. Севастополь,  
 ул. Университетская, 33  
 E-mail: NABalakina@sevsu.ru

**Балакин Алексей Игоревич**  
 ФГАОУ ВО «Севастопольский  
 государственный университет», г. Севастополь  
 Кандидат технических наук,  
 доцент, доцент кафедры  
 «Приборные системы и  
 автоматизация  
 технологических процессов»  
 299053, г. Севастополь,  
 ул. Университетская, 33  
 E-mail: AIBalakin@sevsu.ru

O.V. FILIPOVICH, N.A. BALAKINA, A.I. BALAKIN

## MODIFICATION OF THE METHOD FOR ANALYZING THE INFLUENCE OF MEASUREMENT ERRORS ON THE INDICATORS OF SELECTIVE ASSEMBLY OF TWO ELEMENTS BY APPLYING MULTIPLE MEASUREMENTS

**Abstract.** The process of single-parameter selective assembly of two elements forming a precision joint is considered. It is assumed that the input and output parameters of the product are related by a known linear dependence. A model of the process under conditions of non-precision measurements and a method allowing to take into account the influence of measurement errors when sorting the elements into selective groups and to determine the quality indicators of the assembly process are given. One of the possible options for increasing the accuracy of measurements and reducing the influence of random errors is multiple measurements. Modification of the model and method for the case of application of multiple measurements at sorting of elements into selective groups is made. The example of modelling and dependence of probability of formation of acceptable assembly sets on number of measurements at various limiting errors is given. The results are analysed and prospects for further research are outlined.

**Keywords:** *selective assembly, single-variant set-making, mathematical model, sorting, measurement error, multiple measurements.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Novitskiy P.V. Otsenka pogreshnostey rezul'tatov izmereniy /P.V. Novitskiy, I.A. Zograf. Izd.2-ye pererab. i dop. – L.: Energoatomizdat. Leningr. otd-niye, – 1991. – 304 s.
2. Bonch-Osmolovskiy M.A. Selektivnaya sborka /M.A. Bonch-Osmolovskiy. – M.: Mashinostroyeniye, 1974. – 144s.
3. Bulovskiy P.I. Avtomatizatsiya selektivnoy sborki priborov /P.I. Bulovskiy, G.V. Krylov, V.A. Lo-pukhin. – L.: Mashinostroyeniye. Leningr. otd-niye, 1978. – 232s.
4. Katkovnik V.YA. Osnovy teorii selektivnoy sborki /V.YA. Katkovnik, A.I. Savchenko. – L.: Politekhni-ka, 1991. – 303 s.
5. Filipovich O.V. Model' protsessa odnparametricheskoy selektivnoy sborki slozhnykh izdeliy /O.V. Filipovich, A.G. Karlov, N.A. Voloshina //Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. – 2021. – № 5. – S. 398-403.
6. Kannan S.M. A new selective assembly model for achieving specified clearance in radial assembly /S.M. Kannan, G.R. Pandian //Materials Today: Proceedings, 2021. Volume 46, Part 17. pp. 7411-7417. DOI:10.1016/j.matpr.2020.12.1229.
7. Demir O.E. Function-based selective and adaptive cyber-physical assembly system for increased quality in optoelectronics industry /O.E. Demir, M. Colledani, R. Paoletti R. [etc.] //Computers in Industry, 2023. V.148. 103915. DOI:10.1016/j.compind.2023.103915.
8. Clotey T. Sharing Quality-Distribution Information for the Selective Assembly of Intermediary Components in the Automotive Industry /T. Clotey, Wc. Benton //Production and Operations Management, 2019. DOI:10.1111/poms.13094.
9. Thys Th. Selective assembly of planetary gear stages to improve load sharing /Th. Thys, W. Smet //Forschung im Ingenieurwesen, 2023. 87. pp. 1-9. DOI: 10.1007/s10010-023-00646-x.
10. Xing M. Optimization of Selective Assembly for Shafts and Holes Based on Relative Entropy and Dynamic Programming /M. Xing, Q. Zhang, X. Jin [etc.] //Entropy, 2020. 22. 1211. DOI: 10.3390/e22111211.
11. Kesoyan A.G. Issledovaniye vliyaniya pogreshnosti izmereniya detaley na sobirayemost' pretsizionnykh soyedineniy /A.G. Kesoyan, L.A. Rabinovich, N.V. Kobzev //Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2009. – T.5. – №8(56). – S. 92–98.
12. Filipovich O.V. Opredeleniye kolichestva komplektov pri selektivnoy sborke dvukh elementov s uche-tom vliyaniya pogreshnosti izmereniya /O.V. Filipovich, G.V. Nevar, N.A. Voloshina, V.O. Filipovich //Sborka v mashinostroyenii, priborostroyenii. – 2023. – № 3. – S. 105-109.
13. Filipovich O.V. Model' protsessa odnvariantnoy odnparametricheskoy selektivnoy sborki dvukh elementov s uchetom pogreshnostey izmereniya pri ikh sortirovke /O.V. Filipovich //Avtomatizatsiya i izmereniya v mashino- priborostroyenii. – 2023. – № 3(23). – S. 93-101.
14. Filipovich O. Method for taking into account measurement errors when sorting elements into selective groups /O. Filipovich, G. Nevar, N. Balakina [etc.] //International Russian Automation Conference (RusAutoCon 2023): Advances in Automation V, 2024. – PP. 174-182. DOI: 10.1007/978-3-031-51127-1\_17.
15. Entropiynyy podkhod k analizu metrologicheskikh kharakteristik izmeritel'nykh priborov v mashi-no-priborostroyenii / V. YA. Kopp, A. I. Balakin, A. A. Skidan [i dr.]. – Sevastopol': Krymskiy Izdatel'skiy Dom, 2020. – 340 s.
16. Kopp V.Ja. Analiz primenimosti kompozitsionnogo zakona pri izmereniyah v mashino-priborostroyenii /V.Ja. Kopp, A.I. Balakin // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tehnologii. – 2017. – № 4-1(324). – S. 23-36.
17. Kopp V.Ja. Analiz maksimal'noy differentsial'noy jentropii i dispersii kompozitsii sluchajnykh velichin, sosredotochennykh na konechnykh intervalah /V. Ja. Kopp, A. I. Balakin // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tehnologii. – 2018. – № 4-2(330). – S. 9-18.
18. Kopp V.Ja. Vozmozhnost' ispol'zovaniya polinomial'noy approksimatsii pri analize differentsial'noy jentropii sluchajnykh velichin, sosredotochennykh na konechnom intervale /V.Ja. Kopp, A.I. Balakin, N.A. Balakina // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tehnologii. – 2019. – № 4-2(336). – S. 51-58.

**Filipovich Oleg Viktorovich**

Sevastopol State University,  
Candidate of Technical Sciences,  
Docent, Head of the Department of  
Instrumentation Systems and  
Automation of Technological Processes  
299053, Sevastopol, Universitetskaya  
st., 33  
+7 (8692) 41-77-41 ext. 1090  
E-mail: ophisl@yandex.ru

**Balakina Natalia Anatolievna**

Sevastopol State University,  
Senior lecturer of the Department of  
Instrumentation Systems and  
Automation of Technological  
Processes  
299053, Sevastopol,  
Universitetskaya st., 33  
E-mail:  
NABalakina@mail.sevsu.ru

**Balakin Alexey Igorevich**

Sevastopol State University,  
Candidate of Technical Sciences,  
Docent, Associate Professor of the  
Department of Instrumentation  
Systems and Automation of  
Technological Processes  
299053, Sevastopol,  
Universitetskaya st., 33  
E-mail: AIBalakin@mail.sevsu.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/fipptt>  
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 23.04.2024 г.  
Дата выхода в свет 14.06.2024 г.  
Формат 70X108/16. Усл. печ. л. 12,4375  
Цена свободная. Тираж 1000 экз.  
Заказ № 135

Отпечатано с готового оригинал–макета  
на полиграфической базе ОГУ имени И.С. Тургенева  
302026, Орловская область, г. Орёл, ул. Комсомольская, д. 95