

ISSN 2073-7408

# ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

3 (365) 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)

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

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

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

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

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

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

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

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

(Азербайджан)

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

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

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

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

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

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

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

(Беларусь)

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

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

Ответственный редактор:

Тюхта А.В. канд. техн. наук

Адрес редакции

302030, Орловская обл., г. Орёл, ул.

Московская, 34

+7 (905) 169 88 99

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

E-mail: radsu@rambler.ru

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

Подписанной индекс 29504

по объединенному каталогу

«Прессы России»

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

© ОГУ имени И.С. Тургенева, 2024

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

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

Содержание

Теоретическая механика и ее приложения

Шоркин В.С., Фроленкова Л.Ю., Ромашин С.Н., Преснегова В.Ю., Конищева А.И. Высокочастотные упругие волны – источник фононного газа и теплового эффекта.....	3
Бохонский А.И., Варминская Н.И., Рыжков А.И. Разделение оптимального поворота объекта на разгон и равномерное вращение с последующим торможением.....	14

Механика деформируемого твердого тела, динамика и прочность

Сафина Г.Ф. Диагностирование жесткостей опор валов обрабатывающего механизма по частотам его асимметричных колебаний.....	21
Гайнулина Я.Н. Работа упруго – пластических оболочек в состоянии предельного равновесия при глубоководных экспериментах.....	26

Машиностроительные технологии и оборудование

Кожус О.Г., Барсуков Г.В., Галиновский А.Л., Журавлева Т.А., Тинякова Е.А., Преснегова В.Ю. Моделирование кинематических характеристик движения абразивных частиц в сопле гидроабразивного станка с ПАВ .....	31
Типалин С.А., Куприянова Н.А., Борисов Н.Д. Искривление листового материала при резке наклонным ножом.....	40
Барсуков Г.В., Черепенко А.А. Моделирование процесса гидроабразивной обработки материалов ячеистой сотовой структуры .....	45

Машиноведение и мехатроника

Сызранцев В.Н., Сызранцева К.В., Сердюк И.С. Расчет распределенной по площадке контакта нагрузки в зацеплении прямых и бочкообразных зубьев в условиях их перекоса.....	52
Грибанов Е.Н., Гориков А.И., Иванов Р.Е., Данилевич Д.В. Контроль качества и геометрических параметров поверхности монокристаллов кремния методом атомно- силовой микроскопии на рабочих поверхностях мехатронных механизмов .....	62
Литовченко М.Г., Шутин Д.В. Программно-аппаратная система полуактивной смазки триботронных опор жидкостного трения.....	68
Бондаренко М.Э., Родичева И.В., Серебренников А.Д., Смирнова К.В. Влияние активных комбинированных подшипников на динамику многомассового ротора....	77
Лю Ифань Статическая жесткость конических кольцевых демпферов подшипников жидкостного трения .....	87
Сытин А.В., Горин А.М., Внуков С.С., Серебренников А.Д., Серенко И.А. Особенности применения электромагнитных муфт для автоматизации экспериментальных исследований роторных систем .....	96
Зелинский В.В., Борисова Е.А., Карпов А.В., Сучилин Д.Н. Влияние приработочного изнашивания на площадь контакта в подшипниках скольжения тракторных двигателей .....	105
Абакарова Д.А., Настепанин К.К., Поляков Р.Н. Экспериментальное исследование трения и нагрузочной способности клино-винтовой передачи .....	111
Родичев А.Ю., Ху Джиган, Прудников М.И., Хан Юлей, Савин Л.А., Родичева И.В. Триботехнические свойства поверхностей трения с твердыми антифрикционными покрытиями .....	118
Поздняков В.В., Поляков Р.Н., Соломин О.В. Методика определения перечня критических узлов насосов путем анализа качества эксплуатации в реальных условиях .....	126

Приборы, биотехнические системы и технологии

Ганина Е.А., Рябышенков А.С., Харламов Н.Р., Каракеян В.И., Чудакова М.А., Колупаев И.А. Оценка риска для здоровья населения от выбросов производств микролитроники .....	134
--	-----

Контроль, диагностика, испытания и управление качеством

Ефремова Е.С., Солдаткин В.В., Солдаткин В.М. Модели и анализ погрешностей каналов информационно-измерительной системы воздушных сигналов на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего потока.....	142
Солдаткин В.М., Солдаткин В.В., Ефремова Е.С., Солдаткин В.С. Информационно- измерительная система воздушных сигналов летательного аппарата на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего воздушного потока.....	151
Сидорин В.В., Халиполина Н.Б. Прогнозирование результативности проектной деятельности на основе метода таблицы истинности (truth table method, ТТМ).....	160
Муленко И.Г., Пучка О.В., Рябко В.В., Милер А.О., Пелищенко К.А. Анализ отечественного аналога автоматизированной системы учета параметров нефтепродуктов на нефтебазах .....	174
Морозов О.О., Потапов Б.В., Щербаков П.С. Исследование возможностей технологий искусственного интеллекта в задачах диагностики состояния полимерных армированных трубопроводов .....	182

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

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

*Editorial Committee*

*Editor-in-chief*

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

*Editor-in-chief Assistants:*

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

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

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

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

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

*Member of editorial board:*

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

*Responsible editor:*

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

*Address*

302030, Oryol region, Oryol, st.

Moskovskaya, 34

+7 (905) 169 88 99

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

E-mail: radsu@rambler.ru

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

Index on the catalogue of the

«Pressa Rossi» 29504

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

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

© Orel State University, 2024

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

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

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).

## **Contents**

### **Theoretical mechanics and its applications**

Shorkin V.S., Frolenkova L.Yu., Romashin S.N., Presnetsova V.Yu., Konisheva A.I. High-frequency elastic waves – source of phonon gas and thermal effect.....	3
Bokhonsky A.I., Varminskaya N.I., Ryzhkov A.I. Division of the optimal rotation of an object into acceleration and uniform rotation with subsequent braking.....	14

### **Mechanics of deformable solids, dynamics and strength**

Safina G.F. Diagnostics of rigidity of supports of shafts of processing mechanism by frequencies of its asymmetric oscillations.....	21
Gainullina Ya.N. The operation of elastic – plastic shells in a state of extreme equilibrium during deep-sea experiments.....	26

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

Kozhus O.G., Barsukov G.V., Galinovsky A.L., Zhurayleva T.A., Tinyakova E.A., Presnetsova V.Yu. Modeling of the kinematic characteristics of the movement of abrasive particles in the nozzle of a waterjet machine with surfactants.....	31
Tipalin S.A., Kupriyanova N.A., Borisov N.D. Curvature of the sheet material when cutting with an inclined knife.....	40
Barsukov G.V., Cherepenko A.A. Modeling of the process of waterjet treatment of cellular cellular structure materials.....	45

### **Machine Science and Mechatronics**

Syrrantsev V.N., Syrrantseva K.V., Serdyuk I.S. Calculation of the load distributed over the contact area in the meshing of straight and barrel-shaped teeth under conditions of their skewing.....	52
Gribanov E.N., Gorshkov A.I., Ivanov R.E., Danilevich D.V. Control of quality and geometrical parameters of the surface of silicon monocrystals by atomic force microscopy on the working surfaces of mechatronic mechanisms.....	62
Litovchenko M.G., Shutin D.V. Software and hardware system of semi-active lubrication tribotronic fluid friction supports.....	68
Bondarenko M.E., Rodicheva I.V., Serebrennikov A.D., Smirnova K.V. Influence of active combined bearings on the dynamics of a multimass rotor.....	77
Liu Yifan Static stiffness of conical ring dampers of fluid film bearings.....	87
Sytin A.V., Gorin A.V., Vnukov S.S., Serebrennikov A.D., Serenko I.A. Features of the use of electromagnetic couplings for automation of experimental studies of rotary systems .....	96
Zelinsky V.V., Borisova E.A., Karpov A.V., Suchilin D.N. Influence of running-in wear on the contact area in sliding bearings of tractor engines .....	105
Abakarova D.R., Nastepanik K.K., Polyakov R.N. Experimental study of friction and load capacity of a hybrid wedge-screw gear .....	111
Rodichev A.Yu., Hu Zhigang, Prudnikov M.I., Hang Yulei, Savin L.A., Rodicheva I.V. Tribotechnical properties of friction surfaces with hard anti-friction coatings .....	118
Pozdnyakov V.V., Polyakov R.N., Solomin O.V. Method for determining the list of critical pump components by analyzing operational quality in real conditions .....	126

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

Ganina E.A., Riabyshenkov A.S., Kharlamov N.R., Karakeyan V.I., Chudakova M.A., Kolupaev I.A. Public health risk assessment of emissions from microelectronics production .....	134
---	-----

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

Efremova E.S., Soldatkin V.V., Soldatkin V.M. Models and error analysis of channels of the information and measurement system of air signals based on the ultrasonic method of monitoring the parameters of the incoming flow.....	142
Soldatkin V.M., Soldatkin V.V., Efremova E.S., Soldatkin V.S. Information and measuring system of air signals of an aircraft based on ultrasonic method for monitoring parameters of incident air flow.....	151
Sidorin V.V., Khalilulina N.B. Forecasting the effectiveness of project activities based on the truth table method .....	160
Mulenko I.G., Puchka O.V., Riabko V.V., Miler A.O., Pelipenko K.A. Analysis of domestic analog of the automated system of oil products parameters accounting at oil depots.....	174
Morozov O.O., Potapov B.V., Shcherban P.S. Research on the capabilities of artificial intelligence technologies in diagnosing the condition of polymer reinforced pipelines .....	182

# **ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ**

УДК 531.6; 538.9

DOI: 10.33979/2073-7408-2024-365-3-3-13

В.С. ШОРКИН, Л.Ю. ФРОЛЕНКОВА, С.Н. РОМАШИН,  
В.Ю. ПРЕСНЕЦОВА, А.И. КОНИЩЕВА

## **ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ УПРУГИЕ ВОЛНЫ – ИСТОЧНИК ФОНОННОГО ГАЗА И ТЕПЛОВОГО ЭФФЕКТА**

**Аннотация.** В работе на основании нелокальной модели многочастичных взаимодействий в сплошной упругой среде и ее локального приближения предложен механизм возникновения фононного газа под действием высокочастотных волн, вызванных электромагнитным облучением. Следствием возникновения фононного газа оказался тепловой эффект. Учтено, что электромагнитное поле способно менять механические свойства упругого материала.

**Ключевые слова:** Нелокальная теория упругости, начальное напряженное состояние, высокочастотные упругие волны, электромагнитное облучение, фононный газ, тепловой эффект.

### **Введение**

Современное промышленность, медицина, изготовление пищевых продуктов, приборостроение, другие отрасли широко применяют электрокалорические эффекты в разнообразных научных и производственных целях [1]. Наряду с использованием для нагрева, сушки и размораживания микроволновая обработка применяется в высокотемпературных технологиях, например при производстве огнеупорных и теплоизоляционных материалов, спекании и обжиге керамики, термоупрочнении грунтовых блоков [2]. Одним из способов вызвать необходимые эффекты является микроволновая обработка (МВО) диэлектриков. Микроволновый нагрев применяется благодаря высокой концентрации энергии и быстрому объемному нагреву, а также возможности получения необходимого распределения источников тепла и поля температур в нагреваемом объекте [3]. Нагрев диэлектрика сопровождается развитием температурных напряжений. Термомеханический процесс является нестационарным. Область нестационарного процесса находится вблизи поверхности воздействия. Это затрудняет его изучение.

Актуальность построения математических моделей, описывающих термодинамическое состояние материала в зоне поглощения им энергии электромагнитной волны, проявления электрокалорического эффекта и эффекта электрострикции (в том числе и совместные) очевидна. Такие модели строятся и применяются в теоретических рассуждениях и практических расчетах (например, работа [4]).

Целью данной работы является выявление механизма преобразования энергии высокочастотных волн, возбуждаемых в полярном диэлектрике электрической частью электромагнитной волны, в тепловую энергию посредством фононного газа. Особенностью предлагаемой модели является учет нелокальных взаимодействий репрезентативных частиц материала. Так учитываются потенциальные силы, порожденные силой Кулона между их электрическими диполями. Этот учет применяется при построении материальных соотношений по аналогии с рассуждениями, представленными в работе [5].

### **1 Модели упругой среды**

Материалом, для которого считаются справедливыми рассуждения и результаты данной работы является полярный диэлектрик  $B$ . Он занимает трехмерную область  $\Lambda$ . В процессе деформирования материала  $B$  форма и размеры области  $\Lambda$  могут меняться. Предполагается, что эти деформации так малы, что этими изменениями можно пренебречь. В частности, на основании этого считается, что равномерно распределенная по области  $\Lambda$  в ее начальной конфигурации плотность материала  $\rho$  с течением времени не меняется. Это

допущение распространяется и на другие физико-механические характеристики (если нет специальной оговорки).

В работе рассматриваются три модели его атомно-молекулярной структуры. Первой моделью является дискретный набор  $\{q_j\}$  микрочастиц  $q_j$  (индекс  $j$  означает номер микрочастицы):

$$B = \{q_j\}. \quad (1)$$

Эти микрочастицы являются диполями, под действием внешних сил и моментов не деформируются.

Второй моделью является континуум  $B$ . Его внутренняя часть – всюду плотное множество тел-точек  $b$ . Его граница – двухмерный континуум, также всюду плотное множество тел-точек  $b$ .

Континуум  $B$  можно представить неограниченным множеством (эквивалентным множеству действительных чисел) способов в виде объединения непересекающихся макрочастиц  $\Delta B \rightarrow dB$ . Это третья используемая в данной работе модель.

Считается, что макрочастицы  $\Delta B \rightarrow dB$  являются репрезентативными по отношению к группам микрочастиц дискретного набора  $\{q_j\}$ . При этом

$$B = \bigcup_{n=1}^N \Delta B_n^N = \int dB, \quad (n \neq k) \Rightarrow \Delta B_n^N \cap \Delta B_k^N = \emptyset, \quad (2)$$

где  $N$  – число макрочастиц, на которое мысленно разделено тело  $B$  в одном из множества способов разбиения;

$n, k = 1, 2, \dots, N$  – номера макрочастиц в этом разбиении.

Любое тело-точка  $b \in B$  является центром инерции какой-то макрочастицы  $\Delta B \rightarrow dB$ . В этой точке задаются значения плотностей распределения аддитивных характеристик состояния материала. Пусть  $\mathfrak{I}$  – одна из аддитивных характеристик тела  $B$  в целом. Ее плотностью распределения  $\mathfrak{R}$  считается непрерывная и дифференцируемая функция положения тела-точки  $b \in B$  – ее радиус-вектора  $\vec{r}(\vec{R}, t)$  в текущей конфигурации ( $\vec{r}(\vec{R}, 0) = \vec{R}$ ). Имеет место следующее равенство:

$$\mathfrak{I} = \sum_{n=1}^N \Delta \mathfrak{I}_n^N = \lim_{\substack{N \rightarrow \infty \\ \max(\text{diam} \Delta V_n^N) \rightarrow 0}} \sum_{n=1}^N \mathfrak{R}_n^N(\vec{r}_n^N) \Delta V_n^N = \int_{\Lambda} \mathfrak{R} dV. \quad (3)$$

Точечные тела  $b_n^N$  моделируют макрочастицы  $\Delta B_n^N$ . Их местами  $\vec{r}_n^N$  – центры инерции микрочастиц. Характеристики  $\Delta \mathfrak{I}_n^N = \mathfrak{R}_n^N(\vec{r}_n^N) \Delta V_n^N$  оцениваются в точках  $\vec{r}_n^N$  – радиус-векторах тел-точек  $b_n^N$ , моделирующих макрочастицы  $\Delta B_n^N$ .

Для качественного и количественного описания исследуемых процессов используются нелокальная и локальная модели перечисленных материальных структур.

1 *Нелокальные модели.* Взаимодействие между элементами в наборах  $q_j \in \{q_j\}$ ,  $b_n^N \in \{b_n^N\}$  и  $dB \subset B$  предполагается потенциальным. Потенциалы зависят от расстояний между элементами и их взаимной ориентации. Для микрочастиц  $q_j$  эти потенциалы известны из физики. Те же потенциалы используются и для тел-точек  $b_n^N$ . Их множество используется при построении интегральных сумм (3). Потенциалы для макрочастиц  $dB \subset B$  равны потенциалам для тел-точек в пределе  $N \rightarrow \infty$  [5]. Вектор поляризации  $\vec{p}$  макрочастиц  $dB \subset B$ , попавших в электрическое поле  $\vec{E}$ , пропорционален этому вектору:

$$\vec{p} = \chi \vec{E}. \quad (4)$$

2 *Локальная модель.* Она основана на нелокальной модели для тел-точек. Для описания кинематики континуума используются перемещения  $\vec{u}$  и вращения  $\vec{\phi}$  макрочастиц  $dB \subset B$ . Их кинематика характеризуется тензорами:

$$v_1 \equiv \nabla \vec{u}, \quad v_2 \equiv \nabla^2 \vec{u}, \quad v_3 \equiv (\nabla \vec{u})^A - I \times \vec{\phi}, \quad v_4 \equiv \nabla \vec{\phi}. \quad (5)$$

Выражения, которое определяет зависимость объемной плотности  $w$  потенциальной энергии рассматриваемого материала, имеет вид:

$$w = w(v_1, v_2, v_3, v_4) = w_0 + \Delta w, \quad \Delta w = \Gamma_\alpha \cdot v_\alpha^T + \frac{1}{2} v_\alpha \cdot H_{\alpha\eta} \cdot v_\eta^T; \quad (6)$$

$$\Gamma_\alpha = \left. \frac{\partial w}{\partial v_\alpha} \right|_{v_\alpha=0}, \quad H_{\alpha\eta} = \left. \frac{\partial^2 w}{\partial v_\alpha \partial v_\eta} \right|_{v_\alpha=0}. \quad (7)$$

Функция  $w(v_1, v_2, v_3, v_4)$  определяется нелокальной моделью.

Начально-краевая задача и материальные выражения для тензоров напряжений в общем виде формулируются следующим образом.

$$\text{Для } \vec{r} \in \Lambda, t > 0: \quad \rho \ddot{\vec{u}} = \nabla \cdot (P^{(1)} - \nabla \cdot P^{(2)}) + \vec{f}, \quad I \cdot \ddot{\vec{\phi}} = \nabla \cdot M + P^{(1)A} + \vec{m}. \quad (8)$$

$$\text{Для } \vec{r} \in \partial \Lambda, t > 0: \quad \vec{n} \cdot (P^{(1)} - \nabla \cdot P^{(2)}) - \nabla_{\partial \Lambda} \cdot (\vec{n} \cdot P^{(2)}) = \vec{\Pi}_1 \quad \text{или} \quad \vec{u} = \vec{u}_{\partial \Lambda},$$

$$(\vec{n} \otimes \vec{n}) \cdot P^{(2)} = \vec{\Pi}_2 \quad \text{или} \quad \frac{\partial \vec{u}}{\partial n} = \left( \frac{\partial \vec{u}}{\partial n} \right)_{\partial \Lambda}, \quad \vec{n} \cdot M = \vec{M} \quad \text{или} \quad \vec{\phi} = \vec{\phi}_{\partial \Lambda}. \quad (9)$$

$$\text{Для } \vec{r} \in \Lambda, t = 0: \quad \vec{u} = \vec{u}_0, \quad \dot{\vec{u}} = \dot{\vec{u}}_0, \quad \vec{\phi} = \vec{\phi}_0, \quad \dot{\vec{\phi}} = \dot{\vec{\phi}}_0,$$

$$P^{(1)} \equiv \frac{\partial w}{\partial (\nabla \vec{u})} = P_0^{(1)} + H_{1\beta} \cdot v_\beta, \quad P^{(2)} \equiv \frac{\partial w}{\partial v_2} \equiv \frac{\partial w}{\partial (\nabla^2 \vec{u})} = P_0^{(2)} + H_{2\beta} \cdot v_\beta, \quad (10)$$

$$M = \frac{\partial w}{\partial (\nabla \vec{\phi})} = M_0 + H_{4\beta} \cdot v_\beta. \quad (11)$$

Предлагаемая микрополярная модель отличается от традиционной модели:

1) учетом начальных напряжений и перекрестных эффектов;

2) возможностью вычислять материальные характеристики и менять их с помощью электрического поля;

3) используется зависимость термомеханических свойств материала от электрического поля.

## 2 Влияние электрической волны на свойства диэлектрика

Интенсивность электрической волны, распространяющейся в поглощающем ее энергию диэлектрике, описывается законом Бугера [6] (см. рисунок 1).

$$Q_E(x) = Q_0 e^{-K_\omega x}. \quad (12)$$

Вектор электрического поля, создаваемого этой волной в диэлектрике:

$$\vec{E}(x, t) = \left( \vec{E}_0 e^{-(K_\omega/2)x} \right) \sin(\omega t - k_B x). \quad (13)$$

Вектор  $\vec{E}$  не вращается. Следовательно, не вращается и вектор поляризации  $\vec{p} = \chi \vec{E}$ . Поэтому применяется классическая модель линейно упругого материала без учета поворотов. Модель отличается от классической модели появлением начальных напряжений, обусловленных электрическим полем [5]. Их изменение из-за этого происходит на много быстрее развития теплового движения. Предлагаемая в работе модель механизм учитывает это. Допускается, что изменения свойств материала происходят одновременно с изменением электрического поля.

С учетом сказанного, в представленных выше общих выражениях (8) – (11), делаются следующие допущения.

Внешние силы и моменты отсутствуют:

$$\vec{f} = 0, \quad \vec{m} = 0, \quad \vec{\Pi}_2 = 0, \quad \vec{M} = 0. \quad (14)$$

Для кинематики нет следующих характеристик:

$$(\nabla \vec{u})^A, \quad \vec{\phi}, \quad (\nabla \vec{u})^A - I \times \vec{\phi}, \quad \nabla \vec{\phi}. \quad (15)$$

Деформации описываются только симметричной частью градиента перемещений

$$\varepsilon = (\nabla \vec{u})^S \neq 0. \quad (16)$$

Тензор напряжений принятой модели имеет вид:

$$P^{(1)} = P_0^{(1)} + C \cdot \varepsilon. \quad (17)$$

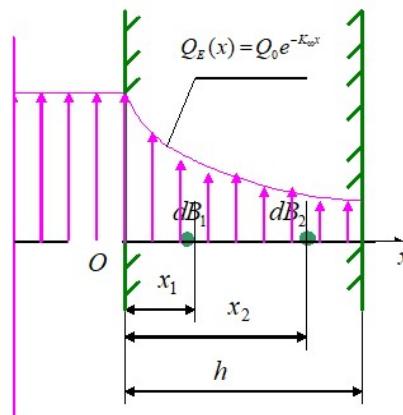


Рисунок 1 – Диаграмма взаимодействия электрической волны с диэлектрической пластиной

О тензоре начальных напряжений  $P_0^{(1)}$  предполагается, что он имеет два слагаемых:

$$P_0^{(1)} = P_{0(tr)}^{(1)} + P_{0(E)}^{(1)}. \quad (18)$$

Первое слагаемое – тензор  $P_{0(tr)}^{(1)}$  описывает те напряжения, которые в отсутствии действующего на них электрического поля. Для естественного состояния принято:

$$P_{0(tr)}^{(1)} = 0 \quad (19)$$

Тензор  $P_{0(E)}^{(1)}$  также является суммой двух тензоров:

$$P_{0(E)}^{(1)} = P_{0(E)u}^{(1)} + P_{0(E)\gamma}^{(1)}. \quad (20)$$

Тензор  $P_{0(E)u}^{(1)}$  возникает из-за изменений расстояния между диполями в электрическом поле.

Тензор  $P_{0(E)\gamma}^{(1)}$  – это тензор напряжений, которые возникают, из-за влияния расстояния между диполями на изменения их взаимной ориентации. Принято:

$$P_{0(E)\gamma}^{(1)} = 0. \quad (21)$$

Тогда оказывается, что

$$P_0^{(1)} = P_{0(E)}^{(1)} = P_{0(E)u}^{(1)} \quad (22)$$

То есть, переменное электрическое поле породило не зависящий от деформаций тензор начальных напряжений. Если это поле меняется с течением времени (в рассматриваемой в работе ситуации с высокой частотой) то меняются и внутренние напряжения, которые могут стать источником высокочастотных механических волн.

### 3 Условие появления теплового эффекта

Объемная плотность свободной энергии при малых деформациях  $\varepsilon$  материала и изменении абсолютной температуры  $\theta = T - T_0$  от значения  $T_0$  до значения  $T$  определяется равенством

$$F = F_0 + \left( \frac{\partial F}{\partial \varepsilon} \right) \cdot \varepsilon + \left( \frac{\partial F}{\partial \theta} \right) \theta + \frac{1}{2} \left[ \varepsilon \cdot \left( \frac{\partial^2 F}{\partial \varepsilon^2} \right) \cdot \varepsilon + 2 \left( \frac{\partial^2 F}{\partial \varepsilon \partial \theta} \right) \cdot \varepsilon \theta + \left( \frac{\partial^2 F}{\partial \theta^2} \right) \theta^2 \right], \quad (23)$$

где  $F_0$  – начальная свободная энергия;

$\left( \frac{\partial F}{\partial \varepsilon} \right) = P_0^{(1)}$  – тензор начальных напряжений;

$\left(\frac{\partial F}{\partial \theta}\right) = S_0$  – энтропия относительно состояния температуры при  $T_0 = 0$ ;

$\left(\frac{\partial^2 F}{\partial \varepsilon^2}\right) = C$  – тензор материальных констант;

$\left(\frac{\partial^2 F}{\partial \varepsilon \partial \theta}\right)$  – характеристика температурных напряжений;  $\left(\frac{\partial^2 F}{\partial \theta^2}\right)$  – теплоемкость.

Все коэффициенты многочлена  $F = F(\varepsilon, \theta)$ , кроме второго и последнего, определяются через известные потенциалы межчастичных взаимодействий методами нелокальной теории [5]. При наличии и отсутствии электрического поля эти потенциалы, а значит и значения коэффициентов разные.

Предполагается, что до попадания в электрическое поле диэлектрик находился в естественном состоянии. Тогда

$$F_0 = 0, \left(\frac{\partial F}{\partial \varepsilon}\right) = 0, \left(\frac{\partial F}{\partial \theta}\right) = 0, \theta = 0, \varepsilon = 0. \quad (24)$$

В момент  $t = 0$  диэлектрик попадает в электрическое поле. Взаимодействие поля с микрочастицами  $q_j$  является потенциальным. Поэтому каждая единица объема континуума мгновенно получает энергию  $F^*$ . Характеристики изменяются до значений

$$F_0^*, \left(\frac{\partial F}{\partial \varepsilon}\right)^*, \left(\frac{\partial^2 F}{\partial \varepsilon^2}\right)^*, \left(\frac{\partial^2 F}{\partial \varepsilon \partial \theta}\right)^*, \left(\frac{\partial^2 F}{\partial \theta^2}\right)^*. \quad (25)$$

Из-за неравномерности их распределения могут возникнуть внутренние напряжения (тензор начальных напряжений), и равновесие нарушится. Из-за наличия инерции микрочастиц через конечное время релаксации  $\tau$  равновесие восстановится. В общем случае возникнут деформации  $\varepsilon \neq 0$ , температура изменится на величину  $\theta \neq 0$ .

Изменение температуры  $\theta$  связано с тепловым эффектом – появлением тепла  $Q_\tau$ . Деформации связаны с работой внутренних сил  $W_\tau$ . В обоих случаях мы имеем дело с изменением свободной энергии. Так как новых поступлений свободной энергии нет, то ее изменение равно нулю:  $\Delta F = 0$ .

$$\begin{aligned} \Delta F &= W_\tau - Q_\tau = \\ &= \left(\frac{\partial F}{\partial \varepsilon}\right)^* \cdots \varepsilon + \left(\frac{\partial F}{\partial \theta}\right)^* \theta + \frac{1}{2} \left[ \varepsilon \cdots \left(\frac{\partial^2 F}{\partial \varepsilon^2}\right)^* \cdots \varepsilon + 2 \left(\frac{\partial^2 F}{\partial \varepsilon \partial \theta}\right)^* \cdots \varepsilon \theta + \left(\frac{\partial^2 F}{\partial \theta^2}\right)^* \theta^2 \right] = 0. \end{aligned} \quad (26)$$

При стремлении  $\theta$  и  $\varepsilon$  к нулю квадратной скобкой можно пренебречь. Тогда условие (26) принимает вид:

$$\left(\frac{\partial F}{\partial \varepsilon}\right)^* \cdots \varepsilon + \left(\frac{\partial F}{\partial \theta}\right)^* \theta = 0. \quad (27)$$

#### 4 Одномерный вариант реализации условия возникновения теплового эффекта

Рассматривается бесконечно протяженная пластина толщиной  $h$ . Ее механические свойства – тензор начальных напряжений  $P_{0(E)u}^{(1)}$ , изменяется действием плоской поляризованной синусоидальной электрической волны известной частоты  $\omega_B$  и амплитуды  $E_1$ . Сначала, с учетом относительных порядков используемых величин, определяемых на примере кремния, строится приближенное выражение тензора начальных напряжений. Тензор давления рассчитывается для макрочастицы  $dB_1$  из плоскости  $x = x_1$ . Учтены нелокальные взаимодействия  $dB_1$  со всеми другими макрочастицами из плоскостей  $x = x_2$  (рисунок 2).

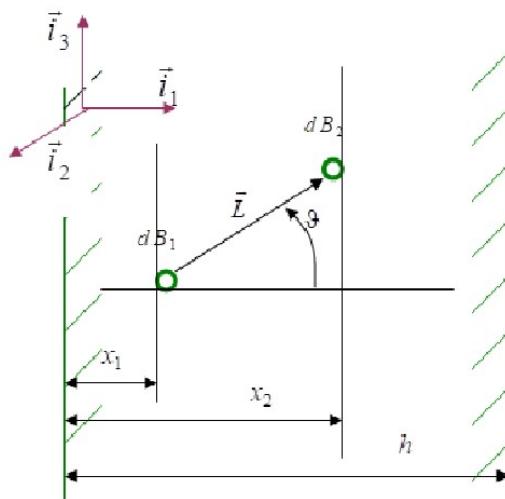


Рисунок 2 – Пара взаимодействующих макрочастиц в нелокальной модели

Для  $dB_2$  с относительной координатой  $\Delta x = x_2 - x_1 = L \sin \vartheta$  в момент времени  $t = t_1 + \eta$  (когда электрическая волна достигнет макрочастицы  $dB_2$ ) величина  $E$  определена формулой

$$E(t_1 + \eta, x_1 + \Delta x) = E_1 \sin(\omega_B \eta - k_B L \sin \vartheta). \quad (28)$$

С учетом того, что материалом диэлектрика является кремний, при построении формулы для вычисления давления, учитываются следующие значения используемых величин. Коэффициент поглощения  $K_\omega \leq 10^6 [m^{-1}]$ ; глубина поглощения  $H_\omega = 1 / K_\omega \approx 10^{-6} [m]$ ; частота электрической волны  $\omega_B \approx 2\pi \cdot 10^{11} [1/c]$ , ее длина  $\lambda_B = 2\pi c_B / \omega \approx 10^{-4} [m] > H_\omega$ .

Учтено, что волновое число  $k_B = 10^5 [1/m]$ . Для  $L \geq 10^{-8} [m]$  потенциал взаимодействия  $dB_1$  и  $dB_2$ :  $\varphi^{(2)}(L) \approx 0$ . Тогда справедливы следующие оценки  $K_\omega L = L / H_B \leq 10^{-2}$ ,  $\sin(k_B L \sin \vartheta) \approx k_B L \sin \vartheta$ ,  $e^{-(K_\omega/2)L \sin \vartheta} \approx 1 - (K_\omega L/2) \sin \vartheta$ .

Для определения тензора давления  $P_{0(or)} = P_{0(or)}(\eta)$  в макрочастице  $dB_2$  получаются следующие выражения

$$P_{0(or)} = (\vec{i}_k \vec{i}_k) p_{(or)}, \quad p_{(or)}(\Delta t) = \left[ \frac{(\chi E_1)^2}{\beta \epsilon_0 \epsilon_r} \right] \left[ \frac{3\pi^2}{4} + \frac{28}{15} \right] \left[ K_\omega \sin^2(\omega \eta) \right] I_\varphi, \\ I_\varphi = \int_0^\infty \xi^4 \frac{d\varphi^{(2)}(\xi)}{d\xi} d\xi. \quad (29)$$

Тензор  $P_{0(or)} = P_{0(or)}(\eta)$  имеет среднее значение  $\langle p_{0(or)} \rangle \neq 0$  за период  $2\tau = 2\pi/\omega$ .

Следующим допущением является то, что результат синусоидального процесса в течение полупериода  $\tau$  равен результату в течение того же полупериода кусочно-постоянного процесса ( $\delta \rightarrow 0$ ) (рисунок 3).

Сделанные выше допущения используются при анализе равенств (26) и (27). Рассматривается первый цикл. В материальном естественном состоянии в его течении:  $S_0 = 0$ . Тогда для величины  $Q_\tau$  и  $W_\tau$  можно получить выражения:

$$Q^F = \int_0^\theta S(\theta) d\theta \approx \frac{c_\varepsilon \theta^2}{T_0}, \quad Q_\tau^F = \frac{c_\varepsilon \theta_\tau^2}{T_0}. \quad (30)$$

$$W_\tau = \int_0^\tau P_{0(or)}(\eta) \cdot d\varepsilon(\eta) \approx \langle p_{0(or)}^0 \rangle \varepsilon(\tau), \quad (31)$$

где  $c_\varepsilon$  – теплоемкость при отсутствии деформаций.

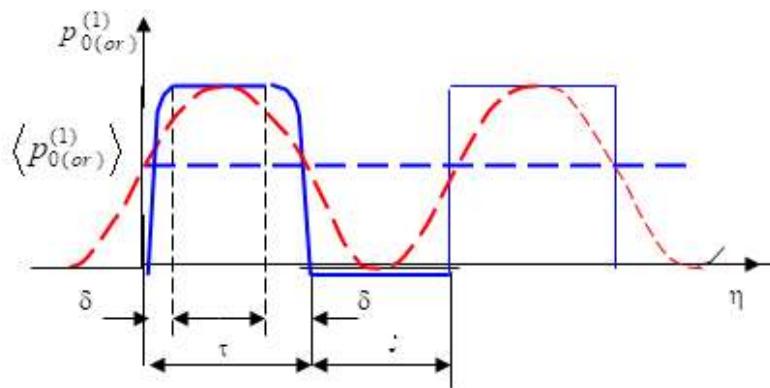


Рисунок 3 – Схема замены функции  $p_0^{(1)}_{(or)} \propto \sin^2(\omega\eta)$  на кусочно-постоянную функцию

Согласно нелокальной модели континуума следствием изменения свойств материала является возникновение деформаций  $\varepsilon(\tau) = \varepsilon_\tau = (\nabla \vec{u})^S \neq 0$ . Тогда  $(W_\tau \neq 0) \Rightarrow (Q_\tau \neq 0)$ , существует тепловой эффект:

$$[W_\tau = Q_\tau^F] \Rightarrow \left[ \theta_\tau = \sqrt{\frac{T_0 \langle p_{(or)}^0 \rangle \varepsilon_\tau}{c_\varepsilon}} \right]. \quad (32)$$

Таким образом, оказалось, что изменение механических свойств диэлектрика, выразившееся в изменении внутреннего начального напряженного состояния, приводит к изменению его температуры. Этот результат получен при рассмотрении явления с использованием определенных допущений. Поэтому возникает необходимость доказательства того, что они не оказывают качественного влияния на полученный результат, а параметр  $\theta_\tau$  действительно соответствует определению понятия «температура».

Рассмотрена динамика перехода к равновесному состоянию после мгновенного появления начального напряжения.

Температура – это количественная характеристика тепловой энергии. Термальная энергия – это сумма энергий тепловых колебаний атомов. Моделью тепловых колебаний решетки является волновая модель [7]. В ней колебания атомов заменяются набором бегущих упругих волн.

В естественном состоянии материала температура  $T = T_0$ . Микрочастицы  $q$  совершают гармонические колебания. Колебания вызывают в кристалле волны с частотами  $\omega_p = \frac{2\pi c_B}{ph}$  и волновыми числами  $k_p = \frac{2\pi}{ph}$  ( $p = 1, 2, \dots$ ). Они являются функциональными рядами по базисному набору

$$u_p = \cos(\omega_p \eta - k_p x). \quad (33)$$

Каждой волне с частотой  $\omega_p$  и волновым числом  $k_p$  ставится в соответствие квазичастица – фонон. Его энергия равна  $\hbar\omega_p$ . Среднее число фононов  $\langle n \rangle$  и средняя энергия  $\langle W \rangle$  в каждом состоянии определяются формулами Планка [9]

$$\langle n \rangle_p = \frac{1}{e^{\hbar\omega_p/k_B T_0} - 1}, \quad \langle W \rangle_p = \frac{\hbar\omega_p}{e^{\hbar\omega_p/k_B T_0} - 1}, \quad \langle W \rangle_p = \langle n \rangle_p (\hbar\omega_p). \quad (34)$$

Из-за действия электрического поля в решетке возникают новые волны. При этом набор базисных волн  $u_p = \cos(\omega_p \eta - k_p x)$  сохраняется. Меняются их амплитуды. Волны длинные. Группы соседних атомов совершают колебания с почти одинаковой амплитудой. Такие группы предлагается считать репрезентативными для макрочастиц  $dB$  континуума. Их кинетическая

энергия увеличивает ту кинетическую энергию репрезентативных групп микрочастиц, которая была до включения электрического поля. Она должна влиять на температуру материала.

Далее предложена реализация этих представлений.

В момент  $\eta=0$  ( $t=t_1+\delta$ ) ( $\delta \rightarrow 0$ ) для всех  $x \in [0, h]$  возникает начальное напряженное состояние и начинается движение континуума. Оно происходит в течение времени  $t=t_1+\eta$ ,  $\eta \in [\delta, \tau-\delta]$ , на всех расстояниях  $x \in [0, h]$  от границы. Оно характеризуется перемещениям  $u=u(x, \eta)$ .

$$\text{Начальные условия } \frac{\partial u(x, 0)}{\partial \eta} = 0, \quad u(x, 0) = 0. \quad (35)$$

$$\text{Границные условия } \frac{\partial u(0, t)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial u(h, t)}{\partial x} = 0. \quad (36)$$

Они свидетельствуют об отсутствии напряжений на границе. (Распределение напряжений  $\langle p_{(or)}^0 \rangle = \sigma(x)$  удовлетворяет условиям  $\sigma(0) = \sigma(h) = 0$ ).

Для функции  $u=u(x, \eta)$  выполняется волновое уравнение

$$\frac{\partial^2 u}{\partial \eta^2} - c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = f(x), \quad c^2 = \frac{2\mu + \lambda}{\rho}, \quad f(x) = \frac{1}{\rho} \sigma(x). \quad (37)$$

Задача имеет следующее решение

$$u(x, \eta) = \sum_{j=1}^{\infty} \left( \frac{f_j}{c^2 k_j^2} \right) [1 - \cos(\omega_j \eta)] \cos(k_j x), \quad \omega_j = \frac{2\pi c}{jh}, \quad k_j = \frac{2\pi}{jh}, \quad (38)$$

где  $f_j$  – коэффициенты представления  $f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} f_n \cos(k_n x)$ .

Движение макрочастиц  $dB$  представлено в виде линейной комбинации бегущих волн  $u_j = \cos(\omega_j \eta - k_j x)$ .

Определение изменения температуры с помощью найденного решения делается следующим образом.

Температура – это мера средней кинетической энергии молекул  $\langle W \rangle$ . Теория кристаллической решетки использует модель газа фононов  $q_p$ . Для определения изменения температуры предлагается использовать модель газа фононов для структуры  $\{b_n^N\}$  тел-точек  $b_n^N$ .

Для тела-точки  $b_n^N$  определяется масса  $m_n^N = \rho(x_n^N) \Delta V_n^N$ . Для нее определяется кинетическая энергия для каждой частоты  $\omega_j$ .

$$(K_n^N)_j = \frac{1}{2} m_n^N (A_{n_j}^N)^2 \omega_j^2 \sin^2(\omega_j \eta). \quad (39)$$

Кинетическая энергия  $(W_n^N)_j$  колебаний осциллятора  $b_n^N$  с частотой  $\omega_j$  определяется равенством.

$$(W_n^N)_j = \langle (K_n^N)_j \rangle_{\tau} = \frac{1}{4} m_n^N (A_{n_j}^N)^2 \omega_j^2, \quad (40)$$

где  $A_{n_j}^N = F_{n_j}^N \cos(k_{n_j} x_n^N)$  – амплитуда колебаний и  $F_{n_j}^N = f_{n_j}^N / \omega_j^2$ ;

$\langle (K_n^N)_j \rangle_{\tau}$  – средняя кинетическая энергия тела-точки  $b_n^N$  за период колебаний.

Кинетическая энергия микрочастиц, из которых состоит макрочастица  $\Delta B_n^N$  – случайная величина. Поэтому кинетическая энергия  $W_n^N$  тела-точки  $b_n^N$  также является случайной величиной. Энергия таких частиц квантуется. Ее квант равен  $\hbar \omega_j$  ( $\hbar$  – постоянная

Планка, деленная на  $2\pi$ ). Фонон – это квазичастица с такой энергией. Число фононов в одном состоянии (с заданной частотой и волновым вектором) может быть сколь угодно большим.

Число  $(\aleph_n^N)_j$  фононов, соответствующих частоте  $\omega_j$  и температуре  $T_0$ , определяется выражением

$$(\aleph_n^N)_j = \frac{1}{\exp(\hbar\omega_j/k_{Bolz}T_0) - 1}, \quad (41)$$

где  $k_{Bolz}$  – постоянная Больцмана.

Изменение этого числа на один фонон при той же частоте  $\omega_j$  для  $\hbar\omega_j/k_{Bolz}T_0 \ll 1$  приводит к равенству

$$[(\aleph_n^N)_j + 1] - (\aleph_n^N)_j = \frac{1}{\exp(\hbar\omega_j/k_{Bolz}(T_0 + \theta_j)) - 1} - \frac{1}{\exp(\hbar\omega_j/k_{Bolz}T_0) - 1} \approx 1 = \frac{k_{Bolz}\theta_j}{\hbar\omega_j}, \quad (42)$$

где  $\theta_j$  – изменение температуры, которое соответствует волне с частотой  $\omega_j$ .

Для  $\hbar\omega_j/k_{Bolz}T_0 \ll 1$  увеличение числа  $(\aleph_n^N)_j$  на один фотон соответствует увеличению энергии на величину

$$\hbar\omega_j = k_{Bolz}\theta_j. \quad (43)$$

Изменение температуры  $\langle \theta_n^N \rangle_\tau$  макрочастицы  $\Delta B_n^N$  с массой  $m_n^N = \rho(x_n^N)\Delta V_n^N$  за время  $\tau$  нахождения принимается равным отношению средних по всем значениям частоты  $\omega_j$  приращений температуры  $\theta_j$ .

$$\langle \theta_n^N \rangle_\tau = \sum_{j=1}^{\infty} (\xi_n^N)_j \theta_j, \quad (44)$$

где  $(\xi_n^N)_j$  – относительное число фононов с частотой  $\omega_j$ , оно определяется равенством

$$(\xi_n^N)_j = \frac{(\aleph_n^N)_j}{(\aleph_n^N)}; \quad (45)$$

$(\aleph_n^N)_j = \frac{(W_n^N)_j}{\hbar\omega_j}$  – число фононов для частоты  $\omega_j$ ;

$(\aleph_n^N) = \sum_{j=1}^{\infty} (\aleph_n^N)_j$  – общее число фононов.

Продолжая преобразования, можно получить выражение суммарной энергии всех фононов макрочастицы  $\Delta B_n^N$  за время  $\tau$ .

$$\langle K_n^N \rangle_\tau = (\aleph_n^N) (k_{Bolz} \langle \theta_n^N \rangle_\tau). \quad (46)$$

Отсюда следует, что изменение температуры  $\langle \theta_n^N \rangle_\tau$  характеризует среднюю энергию одного фонона. Этот вывод аналогичен определению температуры в кинетической теории идеальных газов.

Сделанные рассуждения справедливы для разделения тела  $B$  на конечное число  $N$  частей. При  $N$  стремящемся к бесконечности можно получить распределение прироста температуры для континуума.

### Заключение

1. Предложен механизм преобразования энергии электрических волн в тепловую энергию полярного диэлектрика.

2. В соответствии с этим механизмом показано, что причиной возникновения теплового эффекта является возникновение в твердом материале дополнительных к не учитываемым в естественном состоянии начальных напряжений.

3. Установлена связь между кинетической энергией движения континуума, возникающего при внезапном возникновении дополнительных начальных напряжений, и увеличением из-за этого температуры среды.

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 СВЧ-энергетика: в 3-х т. научное издание: пер. с англ. / под ред. Э. Окressа. – М.: Мир, 1971. – Т. 2: Применение энергии сверхвысоких частот в промышленности. – 272 с.

2 Коломейцев В.А. Распределение электромагнитного и температурного полей в рабочей камере на Н-волноводе / В.А. Коломейцев, В.В. Комаров, В.В. Яковлев // Современные проблемы применения СВЧ энергии. Сб. трудов международной научно-техн. конф., Саратов, 14–15 июня 1993 г. Саратов: Сарат. техн. ун-т, 1993. – С. 59 – 61.

3 Архангельский Ю.С. Сверхвысокочастотные нагревательные установки для интенсификации технологических процессов / Ю.С. Архангельский, И.И. Девяткин. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1983. – 140 с.

4 Blanchard J.P. Elastic Waves Induced by Surface Heating in a Half-Space / J.P. Blanchard // Journal of Applied Mechanics, 2003. – V. 70. – Iss. 4. – P. 613 – 615. DOI:10.1115/1.1571861.

5 Shorkin V.S. Linear theory of micropolar media with internal nonlocal potential interactions / V.S. Shorkin, E.N. Vilchevskaya, H. Altenbach // ZAMM Journal of applied mathematics and mechanics: Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik. – V. 103. – Iss. 2. – e202300099. DOI:10.1002/zamm.202300099.

6 Сивухин Д.В. Общий курс физики / Д.В. Сивухин. – М.: Наука, 2005. – Т. IV. Оптика. – С. 582 – 583.

7 Киттель Ч. Введение в физику твердого тела / Ч. Киттель. – М.: Наука, 1978. – 791 с.

8 Рейсленд Дж. Физика фононов: Пер. с англ. / Дж. Рейсленд; под ред. проф. Г. С. Жданова. – М.: Мир, 1975. – 365 с.

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

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

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

**Преснепова Виктория Юрьевна**  
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С.  
Тургенева», г. Орел  
кандидат технических наук,  
доцент  
доцент кафедры  
информационных систем и  
цифровых технологий  
302026, г. Орел, ул.  
Комсомольская, 95  
Тел.: +7 (910) 303-85-10,  
E-mail: alluvian@mail.ru

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

---

V.S. SHORKIN, L.YU. FROLENKOVA, S.N. ROMASHIN,  
V.YU. PRESNETSOVA, A.I. KONISHEVA

## HIGH-FREQUENCY ELASTIC WAVES – SOURCE OF PHONON GAS AND THERMAL EFFECT

**Abstract.** *In this paper, on the basis of a nonlocal model of multiparticle interactions in a continuous elastic medium and its local approximation, a mechanism of phonon gas emergence under the action of high-frequency waves caused by electromagnetic irradiation is proposed. The consequence of the phonon gas emergence is the thermal effect. It is taken into account that the electromagnetic field can change the mechanical properties of elastic material.*

**Keywords:** *Nonlocal theory of elasticity, initial stress state, high-frequency elastic waves, electromagnetic irradiation, phonon gas, thermal effect.*

## **BIBLIOGRAPHY**

- 1 SVCH-energetika: v 3-h t. nauchnoe izdanie: per. s angl. / pod red. E. Okressa. – M.: Mir, 1971. – T. 2: Primenenie energii sverhvysokih chastot v promyshlennosti. – 272 s.
- 2 Kolomejcev V.A. Raspredelenie elektromagnitnogo i temperaturnogo polej v rabochej kamere na N-volnovode / V.A. Kolomejcev, V.V. Komarov, B.B. YAKOVLEV // Sovremennye problemy primeneniya SVCH energii. Sb. trudov mezhdunarodnoj nauchno-tehn. konf., Saratov, 14–15 iyunya 1993 g. Saratov: Sarat. tekhn. un-t, 1993. – S. 59 – 61.
- 3 Arhangel'skij YU.S. Sverhvysokochastotnye nagrevatel'nye ustavki dlya intensifikacii tekhnologicheskikh processov / YU.S. Arhangel'skij, I.I. Devyatkin. – Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta, 1983. – 140 s.
- 4 Blanchard J.P. Elastic Waves Induced by Surface Heating in a Half-Space / J.P. Blanchard // Journal of Applied Mechanics, 2003. – V. 70. – Iss. 4. – P. 613 – 615. DOI:10.1115/1.1571861.
- 5 Shorkin V.S. Linear theory of micropolar media with internal nonlocal potential interactions / V.S. Shorkin, E.N. Vilchevskaya, H. Altenbach // ZAMM Journal of applied mathematics and mechanics: Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik. – V. 103. – Iss. 2. – e202300099. DOI:10.1002/zamm.202300099.
- 6 Sivuhin D.V. Obshchij kurs fiziki / D.V. Sivuhin. – M.: Nauka, 2005. – T. IV. Optika. – S. 582 – 583.
- 7 Kittel' CH. Vvedenie v fiziku tverdogo tela / CH. Kittel'. – M.: Nauka, 1978. – 791 s.
- 8 Rejslend Dzh. Fizika fononov: Per. s angl. / Dzh. Rejslend; pod red. prof. G. S. ZHDanova. – M.: Mir, 1975. – 365 s.

**Shorkin Vladimir Sergeevich**

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

**Frolenkova Larisa Yuryevna**

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

**Romashin Sergey Nikolaevich**

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

**Presnetsova Victoria Yuryevna**

Orel State University, Orel,  
Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor  
Associate Professor of the  
Department of Information Systems  
and Digital Technologies  
302026, Orel, Komsomolskaya st,  
95  
Ph.: +7 (910) 303-85-10,  
E-mail: alluvian@mail.ru

**Konisheva Alena Igorevna**

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

© В.С. Шоркин, Л.Ю. Фроленкова, С.Н. Ромашин, В.Ю. Преснцева, А.И. Конищева, 2024

А.И. БОХОНСКИЙ, Н.И. ВАРМИНСКАЯ, А.И. РЫЖКОВ

## РАЗДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ПОВОРОТА ОБЪЕКТА НА РАЗГОН И РАВНОМЕРНОЕ ВРАЩЕНИЕ С ПОСЛЕДУЮЩИМ ТОРМОЖЕНИЕМ

**Аннотация.** Исследованы два случая оптимального вращения объекта вокруг неподвижной оси: классическое оптимальное вращение из исходного в конечное состояние покоя ( $n=1$ ) и конструируемое управление ( $n=3$ ). С использованием команды *piecewise* рассмотрен раздельный оптимальный поворот с учетом равномерного вращения между временными интервалами разгона и торможения. Построение управлений иллюстрируется на численных примерах. Используется алгоритм полной обратной задачи вариационного исчисления для поиска оптимального управления. Показано, что увеличение степени ( $n$ ) задаваемого полинома с дополнительными условиями можно уменьшить энергию, затрачиваемую на реализацию движения (из исходного состояния покоя в конечное). Универсальные зависимости позволяют получить частные случаи, включая известную задачу Лагранжа. В случае степени полинома  $n=3$  отмечена экономия энергии для достижения цели движения.

**Ключевые слова:** вариационное и реверсионное исчисление, управление разгон-торможение, разделение движений.

### Введение.

В вариационной теории оптимального управления известна задача Ж.Л. Лагранжа поиска управления «разгон-торможение»: для заданных краевых условий, уравнения и времени движения найти управление, обеспечивающее экстремум принятого квадратичного критерия.

Однако, уже для этой задачи находится управление (ускорение) без участия критерия, а константы полинома – с использованием краевых условий. Используется алгоритм решения полной обратной задачи вариационного исчисления (от исходной функции через уравнение Эйлера к восстанавливаемому функционалу-критерию). Если увеличивать степень задаваемого полинома с добавлением условий уменьшения избыточной энергии, то, с ростом степени полинома, цель достигается с меньшей энергией. Получены универсальные аналитические зависимости, из которых следуют частные случаи, включая и Лагранжа.

При поиске оптимального управления без предварительного задания критерия оптимальности стимулировало замечание, высказанное в книге Теория автоматического регулирования, ч. 2, под. Ред. А.А. Воронова, 1987: «Если же по физическим соображениям убедительно сформулировать критерий оптимальности не удается, то целесообразность постановки оптимальной задачи становится более чем сомнительной».

По поводу решения обратных задач вариационного исчисления (И.Н. Бронштейн, К.А. Семеняев. Справочник по математике, 1981): «В общем случае, однако, построить функционал по заданному дифференциальному уравнению довольно сложно».

Созданы и опубликованы таблицы результатов решения полной обратной задачи вариационного исчисления (реверсионного исчисления).

Основам теории оптимального управления посвящена работа коллектива авторов [1], в которой дано обоснование принципа максимума Понtryгина, рассмотрены не только особенности применения принципа максимума, но и постановки новых задач оптимального управления. Задачи оптимального управления с задаваемым критерием оптимальности и ограничениями рассмотрены, например, в [1-3]. Отметим, что на практике приоритетной является цель управления, критериям оптимальности сопутствуют не строгие рассуждения, а класс самих критериев весьма ограничен.

Методам управления динамическими колебательными системами с приложениями к различным объектам техники посвящены работы [4-9].

Практическое использование теории оптимального управления (управление колебаниями, манипуляционными системами) отражено, на пример, в работе [4]. Для иллюстрации раздельного типа движения использована функция пакета Maple [15]. В [16]

строго обоснованы вопросы приложений теории синтеза оптимального движением объектов техники.

Оптимальным колебательным процессам механических систем посвящена монография [6]. Многие задачи управления решены классическими методами вариационного исчисления.

В [8] найдено и исследовано управление (переносное ускорение) упругого объекта при его быстром перемещении из исходного в конечное состояние абсолютного покоя. Аналитическая функция ускорения в виде синуса в нечетной степени исключает колебания упругого объекта при достижении цели движения. Результаты исследований можно использовать, например, при управлении вращением космического объекта с условием исключения колебаний солнечных батарей (в конечном состоянии).

В [9] исследовано управление переносным движением упругих объектов с использованием импульсов ускорений. Обращено внимание на возможность применения таких управлений для оптимального движения крупногабаритных нежестких конструкций в состоянии невесомости.

Синтезу новых оптимальных управляемых переносных движений упругих систем посвящены работы [11-15], в которых уделено внимание не только совершенствованию алгоритма конструирования управлений, но и техническим приложениям результатов. Обобщение результатов конструирования управлений с использованием алгоритмов решения полной обратной задачи вариационного исчисления (от исходной функции как решения уравнения Эйлера до восстановления функционала-критерия) привело к формулированию реверсионного принципа оптимальности (РПО), отражающего существование экстремума функционала-критерия.

Реверсионный принцип оптимальности подтверждает существование широкого класса кососимметричных оптимальных управлений: перемещением объектов при заданном времени движения и расстояния, перемещение объекта из исходного состояния покоя в конечное состояние покоя, а также подтверждает существование минимальной энергоемкости на реализацию целенаправленного движения. Моделям и алгоритмам конструирования оптимальных управлений жестких и деформируемых объектов при использовании управлений, найденных согласно РПО, посвящены работы [16, 18], в которых динамика объекта в оптимально управляемом движении иллюстрируются на примерах исполнительных органов манипуляторов.

В учебном пособии [19] показано существование широкого класса кососимметричных оптимальных управлений переносным движением объектов техники, полученных с помощью алгоритмов решения полных обратных задач вариационного исчисления. В настоящее время продолжают оставаться актуальными задачи организации оптимальных движений объектов при использовании менее энергоемких управлений. Теоремы реверсионного исчисления отражены в работе [20].

Для построения общих графиков перемещения, скорости и ускорения в оптимальном переносном движении при сопряжении во времени трех участков движения привлечена функция «*piecewise*» (в Maple как для классического случая, так и конструируемого управления).

### **Основная часть.**

**Цель исследования** – изучение оптимального поворота объекта с учетом разделения движения.

Рассмотрим пример классического оптимального управления типа разгон-торможения. Необходимо из исходного состояния покоя повернуть консоль относительного неподвижной оси на заданный угол из исходного состояния покоя при заданном угле и времени движения.

В качестве критерия оптимальности принят квадратичный  $J = \int_0^T \varepsilon_e^2 dt$ ,

где  $\varepsilon_e$  – угловое ускорение стержня с моментом инерции относительно оси, проходящей через конец стержня,

$T$  – общее время вращения стержня при повороте на угол  $F$ .

$$\text{Уравнение вращения } I \frac{d^2\varphi}{dt^2} = M(t), \text{ или } \frac{d^2\varphi}{dt^2} = M(t)/I = \varepsilon(t).$$

Решая задачи вариационным методом (по аналогии, например, с поступательным движением), получим следующие аналитические зависимости для углового ускорения (управления), скорости и угла поворота.

$$\varepsilon(t) = \frac{6F(T-2t)}{T^2}, \quad \omega(t) = \frac{6Ft(T-t)}{T^3}, \quad \varphi(t) = \frac{Ft^2(3T-2t)}{T^3}, \quad (1)$$

где  $F$  – угол поворота;

$T$  – общее время движения, краевые условия  $\varphi(0) = 0, \omega(0) = 0; \varphi(T) = F, \omega(T) = 0$ .

Дальше аналитические преобразования и алгоритм решения и иллюстрируется на численном примере.

### 1. Управление разгон-торможение без разделения на две фазы движения ( $n=1$ ).

Принято:  $F = \pi/2$ ;  $T = 4$  с. Графики функций  $\varphi(t), \omega(t)$  и  $\varepsilon(t)$  изображены на рисунке 1.

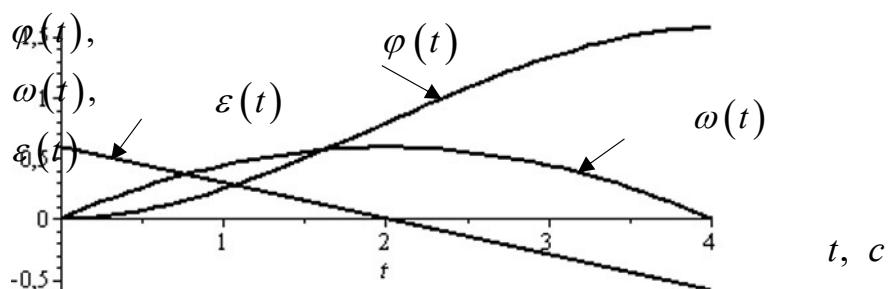


Рисунок 1 – Графики  $\varphi(t), \omega(t)$  и  $\varepsilon(t)$  (при степени полинома  $n=1$ )

При достижении цели движения  $\varphi(t) = \frac{\pi}{2}$  за время  $T = 4$  с. Наступает состояние покоя.

Принципиально важно, что при  $t = T/2$  при разделении движения следует  $\varphi(T/2) = \pi/2$ ;  
 $\omega_0(T/2) = \frac{3\pi}{16}$ .

### 2. Раздельное оптимальное движение разгон-равномерное движение (вращение со скоростью $\omega_0(T)$ ) и последующее торможение до состояния покоя.

Каждому участку вращательного движения соответствуют свои функции  $\varphi(t), \omega(t)$  и  $\varepsilon(t)$ .

На участке  $2 \geq t \geq 0$

$$\varphi(t) = \frac{\pi t^2}{128}(12-2t) \quad (2)$$

где  $T = 4$  с,  $F = \pi/2$ .

На участке равномерного вращения со скоростью  $\omega(t) = \frac{3\pi}{16} \text{ с}^{-1}$  при  $8 \geq t \geq 2$  вращение описывается зависимостью

$$\varphi(t) = -\frac{\pi}{8} + \frac{3}{16}\pi t. \quad (3)$$

Отметим, что при  $t = 2$  с следует  $\varphi(2) = \frac{\pi}{4}$ , а при  $t = 8$ :  $\varphi\left(\frac{T}{2} + \Delta t\right) = \varphi(8) = \frac{11}{8}\pi$ , где

$\Delta t$  – время равномерного вращения. Таким образом, за время  $\Delta t = 6$  с при равномерном движении стержень повернется  $\Delta\varphi = \frac{11}{8}\pi - \frac{\pi}{4} = \frac{9}{8}\pi$ .

На участке торможения  $10 \geq t \geq 8$

$$\varphi(t) = \Delta\varphi + \frac{F(t-6)^2(3T-2(t-6))}{T^3} = \frac{9\pi}{8} + \frac{\pi(t-6)^2(24-2t)}{128}. \quad (4)$$

Графики функций (2), (3) и (4) с использованием команды *piecewise* (в Maple) изображены на рисунке 2.

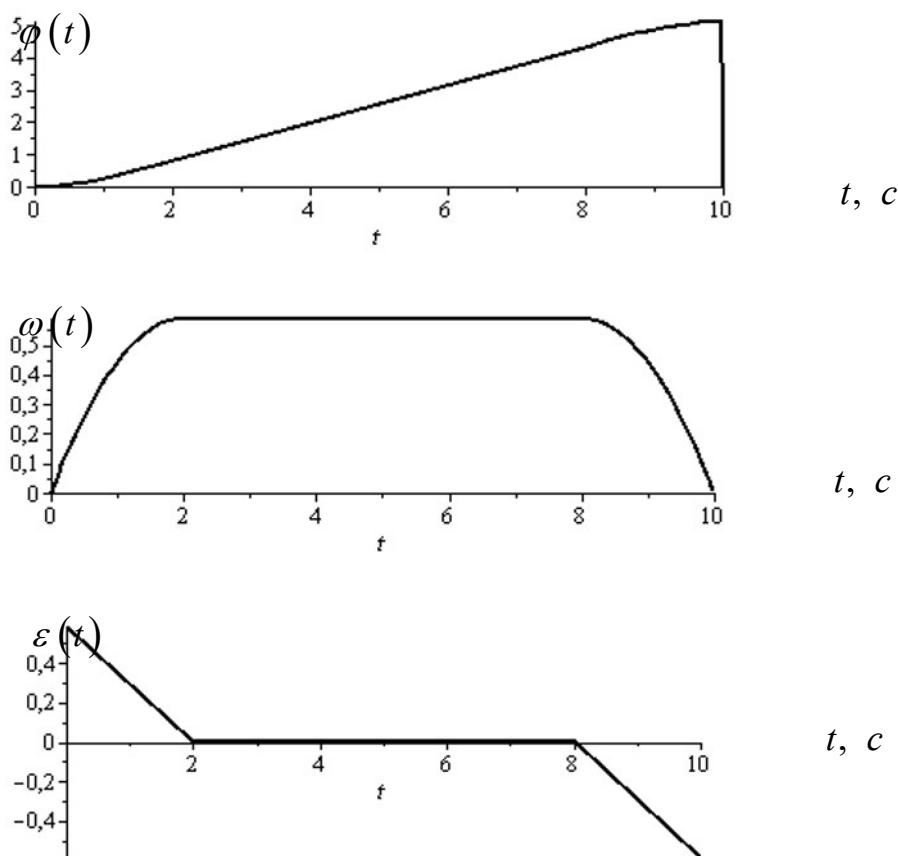


Рисунок 2 – Графики при разделении движений  $\varphi(t)$ ,  $\omega(t)$  и  $\varepsilon(t)$  при разделении движений

### 3. Управление «разгон-торможение» без разделения движений ( $n=3$ ).

Выражения для угла поворота, угловой скорости и углового ускорения имеют вид

$$\varphi(t) = \frac{Ft^2(5T^3 - 10T^2t + 10Tt^2 - 4t^3)}{T^5}, \quad \omega(t) = \frac{10Ft}{T^5}(T-t)(2t^2 - 2tT + T^2), \quad (5)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{10F}{T^5}(T-2t)^3.$$

Графики функций (5) при прежних исходных данных ( $\varphi(T) = \frac{\pi}{2}$ ,  $T = 4$  с), изображены на рисунке 3.

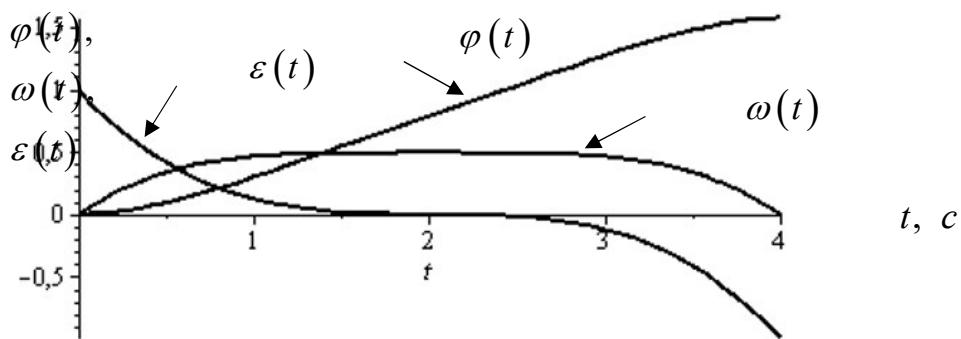


Рисунок 3 – Графики  $\varphi(t)$ ,  $\omega(t)$  и  $\varepsilon(t)$  для случая  $n=3$

Графики раздельного движения построены при использовании с учетом, как и в предыдущем случае, равномерного движения за время (рисунок 4).

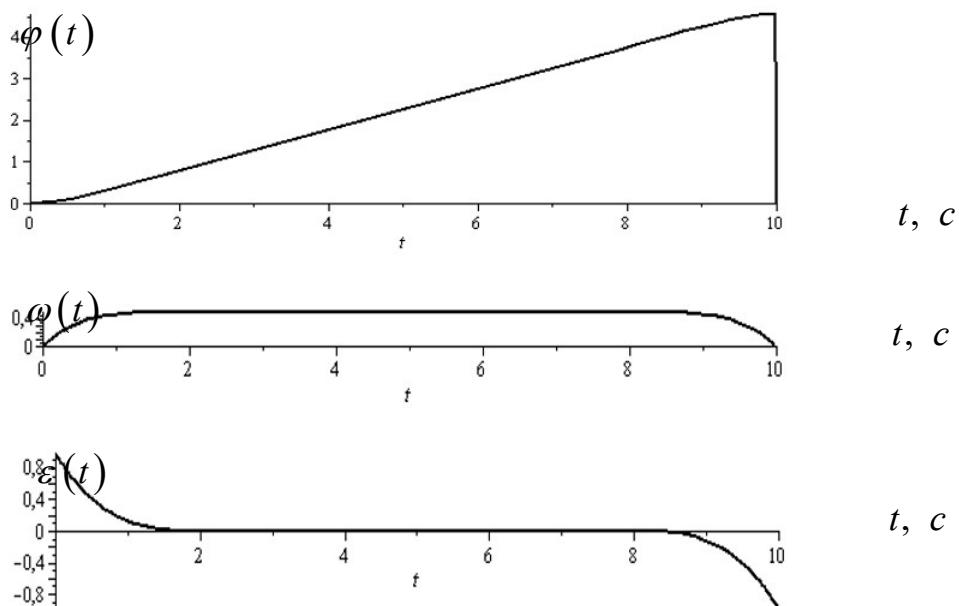


Рисунок 4 – Графики  $\varphi(t)$ ,  $\omega(t)$  и  $\varepsilon(t)$  при разделении движений

Рассмотренное разделение вращательного движения не только облегчает практическую реализацию движений, но и обеспечивает существенную экономию энергии.

#### Заключение.

Предложенный алгоритм разделения движений может быть применим не только в автоматизированном сборочном производстве (при использовании манипуляторов), но и, по аналогии, при поступательном оптимальном движении объекта, например, при движении автомобиля в колонне по прямой дороге. Использованный алгоритм управления подтверждает существование минимального энергетического принуждения для реализации целенаправленного движения объекта.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Понtryгин Л.С. Математическая теория оптимальных процессов / Л.С. Понtryгин, В.Г. Болтянский, Р.В. Гамкrelidze. – М.: Наука, 1983. – 391 с.
2. Красовский Н.Н. Теория управления движением / Н.Н. Красовский. – М.: Наука, 1968. – 476 с.
3. Теория автоматического управления. Ч.II. Теория нелинейных специальных систем автоматического управления / Под ред. А.А. Воронова. – М.: Высш. шк., 1997. – 288 с.
4. Черноуско Ф.Л. Управление колебаниями / Ф.Л. Черноуско, П.Д. Акуленко, Б.Н. Соколов. – М.: Наука, 1980. – 384 с.

5. Гуляев В.И. Оптимальное управление движением механических систем / В.И. Гуляев, В.А. Баженов, В.П. Кошкин. – К.: УМК ВО, 1988. – 235 с.
6. Троицкий В.А. Оптимальные процессы колебаний механических систем / В.А. Троицкий. – Л.: Машиностроение, 1976. – 248 с.
7. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: линейные модели / П.Д. Крутько. – М.: Наука, 1988. – 326 с.
8. Пантелеев А.В. Методы оптимизации в примерах и задачах: Учеб. пособие / А.В. Пантелеев, Т.А. Летова. – М.: Высш. шк., 2002. – 544 с.
9. Абдуллаев Н.Д. Теория и методы проектирования оптимальных регуляторов / Н.Д. Абдуллаев, Ю.Н. Петров. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 240 с.
10. Дьяков В. Maple 7. Учебный курс / В. Дьяков. – СПб.: Питер, 2002. – 672 с.
11. Bokhonsky A.I. Modelling and analysis of elastic system in motion / A.I. Bokhonsky, S.Y. Zolkiewski. – Cliwice: Wydawnictwo Politechniki, 2011. – 171 p.
12. Бохонский А.И. Актуальные задачи вариационные исчисления / А.И. Бохонский. – Rabmarium Academic Publishing, 2013. – 77 р.
13. Бохонский А.И. Управление переносным движением упругих систем / А.И. Бохонский // Динамические системы. – Симферополь: КФТ, 2004. – Вып. 18. – С. 56 – 63.
14. Бохонский А.И. Оптимальное переносное движение упругих объектов / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская // Динамические системы. – Симферополь: ТНУ, 2005. – Вып. 19. – С. 3 – 10.
15. Бохонский А.И. Оптимальное управление переносным движением деформируемых объектов: теория и технические приложения / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, М.И. Мозолевский. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2007. – 296 с.
16. Бохонский А.И., Варминская Н.И. Вариационное и реверсионное исчисления в механике: монография / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2012. – 212 с.
17. Бохонский А.И. Реверсионный принцип оптимальности / А.И. Бохонский. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2016. – 174 с.
18. Бохонский А.И., Варминская Н.И. Конструирование оптимальных управлений перемещением упругих объектов / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская. – Санкт-Петербург: НИЦ МС, 2020. – 120 с.
19. Бохонский А.И. Механика управляемого движения объектов / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, Т.В. Мозолевская. – М.: ИНФРА-М, 2021. – 170 с.
20. Бохонский, А.И. Принцип и теоремы реверсионного исчисления / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, А.И. Рыжков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии – Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева. – № 3 (347), 2021. – С.12 – 21.

**Бохонский Александр Иванович**  
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь  
Профессор, доктор технических наук, профессор кафедры «Цифровое проектирование» 299053, г. Севастополь г. ул. Университетская 33  
Тел. 8 (978) 739-39-68  
E-mail: bohon.alex@mail.ru

**Варминская Наталья Ивановна**  
Черноморское Высшее военно-морское ордена красной звезды Училище имени П.С. Нахимова, г. Севастополь  
Доцент, кандидат технических наук, зав. кафедрой «Физика и общетехнические дисциплины» 299028, г. Севастополь, ул. Дыбенко, д. 1а  
Tel. 8 (978) 832-83-44  
E-mail: nvarminskaya@gmail.com

**Рыжков Александр Игоревич**  
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Цифровое проектирование» 299053, г. Севастополь г. ул. Университетская 33  
Тел. 8 (978) 847-37-49  
E-mail: ryzhkov2206@mail.ru

---

A.I. BOKHONSKY, N.I. VARMINSKAYA, A. I. RYZHKOV

## DIVISION OF THE OPTIMAL ROTATION OF AN OBJECT INTO ACCELERATION AND UNIFORM ROTATION WITH SUBSEQUENT BRAKING

**Abstract.** Two cases of optimal rotation of an object around a fixed axis were studied: classical optimal rotation from the initial to the final state of rest ( $n=1$ ) and constructed control ( $n=3$ ). Using the piecewise command, a separate optimal rotation is considered, taking into account uniform rotation between the acceleration and deceleration time intervals. The construction of controls is illustrated using numerical examples. The algorithm of the complete inverse problem of the calculus of variations is used to find the optimal control. It is shown that increasing the degree ( $n$ ) of a specified polynomial with additional conditions can reduce the energy spent on the implementation of movement (from the initial state of rest to the final state). Universal dependencies make it possible to obtain special cases, including the well-known Lagrange problem. In the case of polynomial degree  $n=3$ , energy savings were noted to achieve the goal of movement.

**Keywords:** variation and reversal calculus, acceleration-braking control, separation of movements.

## BIBLIOGRAPHY

1. Pontryagin L.S. Mathematical theory of optimal processes / L.S. Pontryagin, VG. Boltyansky, R.V. Gamkrelidze. – M.: Nauka, 1983. – 391 p.
2. Krasovsky N.N. Theory of motion control / N.N. Krasovsky. – M.: Nauka, 1968. – 476 p.
3. Theory of automatic control. Part II. Theory of nonlinear special automatic control systems / Ed. A.A. Voronov. – M.: Higher school, 1997. – 288 p.
4. Chernousko F.L. Vibration control / F.L. Chernousko, P.D. Akulenko, B.N. Sokolov. – M.: Nauka, 1980. – 384 p.
5. Gulyaev V.I. Optimal motion control of mechanical systems / V.I. Gulyaev, V.A. Bazhenov, V.P. Koshkin. – K.: UMK VO, 1988. – 235 p.
6. Troitsky V.A. Optimal processes of oscillations of mechanical systems / V.A. Troitsky. – L.: Mechanical Engineering, 1976. – 248 p.
7. Krutko P.D. Inverse problems of dynamics of controlled systems: linear models / P.D. Krutko. – M.: Nauka, 1988. – 326 p.
8. Panteleev A.V. Optimization methods with examples and tasks / A.V. Panteleev, T.A. Letova. – M.: Higher school, 2002. – 544 p.
9. Abdullaev N.D. Theory and methods of designing optimal regulators / N.D. Abdullaev, Yu.N. Petrov. – L.: Energoatomizdat, 1985. – 240 p.
10. Dyakov V. Maple 7. Training course / V. Dyakov. – St. Petersburg: Peter, 2002. – 672 p.
11. Bokhonsky A.I. Modelling and analysis of elastic system in motion / A.I. Bokhonsky, S.Y. Zolkiewski. – Cliwice: Wydawnictwo Politechniki, 2011. – 171 p.
12. Bokhonsky A.I. of Variation calculus actual problems / A.I. Bokhonsky. – Pabmarium Academic Publishing, 2013. – 77 p.
13. Bokhonsky A.I. Control of translational motion of elastic systems / A.I. Bokhonsky // Dynamic systems. – Simferopol: KFT, 2004. – Issue. 18. – pp. 56 – 63.
14. Bokhonsky A.I. Optimal translational motion of elastic objects / A.I. Bokhonsky, N.I. Varminskaya // Dynamic systems. – Simferopol: TNU, 2005. – Issue. 19. – P. 3 – 10.
15. Bokhonsky A.I. Optimal control of translational motion of deformable objects: theory and technical applications / A.I. Bokhonsky, N.I. Varminskaya, M.I. Mozolevsky. – Sevastopol: SevNTU Publishing House, 2007. – 296 p.
16. Bokhonsky A.I., Varminskaya N.I. Variational and reverse calculus in mechanics: monograph / A.I. Bokhonsky, N.I. Varminskaya. – Sevastopol: SevNTU Publishing House, 2012. – 212 p.
17. Bokhonsky A.I. Reverse principle of optimality / A.I. Bokhonsky. – M.: University textbook: INFRA-M, 2016. – 174 p.
18. Bokhonsky A.I., Varminskaya N.I. Design of optimal controls for the elastic objects' motion / A.I. Bokhonsky, N.I. Varminskaya. – St. Petersburg: NIC MS, 2020. – 120 p.
19. Bokhonsky A.I. of Objects controlled motion mechanics / A.I. Bokhonsky, N.I. Varminskaya, T.V. Mozolevskaya. – M.: INFRA-M, 2021. – 170 p.
20. Bokhonsky A.I. Principle and theorems of reverse calculus / A.I. Bokhonsky, N.I. Varminskaya, A.I. Ryzhkov // Fundamental and applied problems of engineering and technology - Orel: OSU named after. I.S. Turgenev. – No. 3 (347), 2021. – P.12 – 21.

**Bokhonsky Alexander Ivanovich**

Federal State Educational Institution of Higher Education "Sevastopol State University", Sevastopol Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Digital Design 33 Universitetskaya str., Sevastopol, 299053, Tel. 8 (978) 739-39-68 E-mail: bohon.alex@mail.ru

**Varminskaya Natalia Ivanovna**

Black Sea Higher Naval Order of the Red Star School named after P.S. Nakhimov, Sevastopol Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Physics and General Technical Disciplines 1a Dybenko str., Sevastopol, 299028 Tel. 8 (978) 832-83-44 E-mail: nvarminska@gmail.com

**Ryzhkov Alexander Igorevich**

Federal State Educational Institution of Higher Education "Sevastopol State University", Sevastopol Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Digital Design 33 Universitetskaya str., Sevastopol, 299053, Tel. 8 (978) 847-37-49 E-mail: ryzhkov2206@mail.ru

© А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, А.И. Рыжков, 2024

# МЕХАНИКА ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА, ДИНАМИКА И ПРОЧНОСТЬ

УДК 517.984, 54.534, 51.74

DOI: 10.33979/2073-7408-2024-365-3-21-25

Г.Ф. САФИНА

## ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ЖЕСТКОСТЕЙ ОПОР ВАЛОВ ОБРАБАТЫВАЮЩЕГО МЕХАНИЗМА ПО ЧАСТОТАМ ЕГО АСИММЕТРИЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ

**Аннотация.** В работе исследуется задача диагностирования жесткостей опор механизма из двух упруго связанных валов, являющегося основой любой обрабатывающей динамической системы. Сформулирована и доказана теорема о существовании и единственности решения поставленной обратной задачи. Приведен алгоритм решения задачи, подтверждающий единственность диагностирования жесткостей опор механизма, показывающий достаточность использования трех значений из спектра частот асимметричных колебаний обрабатывающей системы. К алгоритму решения приведены численные расчеты с применением функциональных команд и встроенных библиотек математического пакета Maple, подтверждающие теоретические выводы и алгоритмы.

**Ключевые слова:** обрабатывающая система, диагностирование, осесимметричные колебания, частотное уравнение, единственность, коэффициенты жесткостей, алгоритм решения.

### Введение

Поставленная в работе задача поиска условий закреплений (жесткостей опор) обрабатывающего механизма по известным значениям частот его асимметричных колебаний относится к задачам виброзащиты механических систем [1]-[4]. В работах вибродиагностики механических конструкций и их компонентов чаще восстанавливаются параметры дифференциального уравнения (уравнений) или граничных условий не по одному, а по нескольким диапазонам частот их свободных колебаний [5]-[7].

Обрабатывающие механизмы – рабочие органы многих технических конструкций, в том числе роторных машин – это чаще всего горизонтально расположенные два вала с упругой связью между ними. Причем один из валов механизма виброактивен – вращается с угловой скоростью, упругое соединение валов – обрабатываемый материал, другой вал транспортирует обрабатываемый материал [8]-[10].

Тогда рассматриваемая в работе задача поиска жесткостей упругих соединений валов такого механизма значима в связи с необходимостью обеспечения как качества обработки, так и виброзащитного функционирования самой обрабатывающей системы. В работе показывается единственность поиска жесткостей упругих валов механизма, причем восстановление идет по конечному набору значений из одного спектра частот, аналогично работам [11], [12]. Приводится алгоритм решения задачи, применение которого демонстрируется на численном примере.

### Постановка задачи

Некоторые численные расчеты первых частот асимметричных колебаний обрабатывающего механизма рассмотрены в статьях [8]-[10]. Простейшая модель механизма представлена на рисунке 1, в котором прогибы (смещения) сечений первого и второго валов, соответственно, обозначены функциями  $y_1(x; t)$ ,  $y_2(t)$  от обобщенной координаты  $x$  и времени  $t$ , жесткость обрабатываемого материала  $C$  (связи между валами), жесткости закреплений валов  $c_1$ ,  $c_2$  (при  $x = 0$ ), длины валов  $l$ .

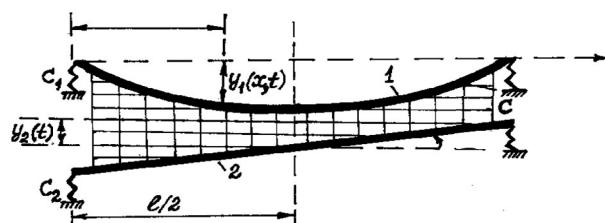


Рисунок 1 – Модель обрабатывающего механизма

Свободные асимметричные колебания подобного обрабатывающего механизма приводят к рассмотрению краевой задачи с уравнениями [8]:

$$E_1 I_1 \frac{\partial^4 y_1(x, t)}{\partial x^4} + \rho_1 \frac{\partial^2 y_1(x, t)}{\partial t^2} + \left( c y_1(x_1, t) - y_2(t) - \left( \frac{l}{2} - x \right) \varphi_2(t) \right) = 0; \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{y}_2(t) + (2c_2 + cl) y_2(t) - c \int_0^l y_1(x, t) dx = 0; \quad (2)$$

$$B_2 \ddot{\varphi}_2(t) + (6c_2 + cl) l^2 \varphi_2(t) / 12 - cl \int_0^l y_1(x, t) dx / 2 + c \int_0^l x y_1(x, t) dx = 0. \quad (3)$$

и краевыми условиями (на концах  $x = 0$  и  $x = l$ )

$$y_1''(0; t) = 0; \quad E_1 I_1 y_1'''(0; t) = -c_1 y_1(0; t); \quad y_1\left(\frac{l}{2}; t\right) = 0; \quad y_1''\left(\frac{l}{2}; t\right) = 0. \quad (4)$$

В задаче (1)-(4):  $\varphi_2(t)$  – функция угла поворота (второго вала от первого);  $m_j$ ,  $\rho_j$ ,  $E_j I_j$ ,  $B_j$  ( $j = 1, 2$ ) – соответственно, массы, плотности, изгибные жесткости, осевые (экваториальные) моменты инерции валов, причем все величины отнесены к единицам длин валов.

В работе [8] с учетом свободных асимметричных колебаний обрабатывающего механизма получено вековое уравнение в виде:

$$\lambda \left( \lambda^4 (6C_2 + k - m(\lambda^4 + k)) + k^2 \right) \left( \lambda^3 \left( \sin \frac{\lambda}{2} \operatorname{ch} \frac{\lambda}{2} + \cos \frac{\lambda}{2} \operatorname{sh} \frac{\lambda}{2} \right) - 2C_1 \operatorname{sh} \frac{\lambda}{2} \sin \frac{\lambda}{2} \right) + 6k^2 C_1 \left( \sin \frac{\lambda}{2} \operatorname{ch} \frac{\lambda}{2} + \operatorname{sh} \frac{\lambda}{2} \cos \frac{\lambda}{2} \right) = 0. \quad (5)$$

В уравнении (5) содержатся параметры:

$$\lambda^4 = \frac{(\rho_1 \omega^2 - c) l^4}{E_1 I_1}; \quad C_1 = \frac{c_1 l^3}{E_1 I_1}; \quad C_2 = \frac{c_2 l^3}{E_2 I_2}; \quad k = \frac{cl^4}{E_1 I_1}; \quad m = \frac{12B_2}{\rho_1 l^3}. \quad (6)$$

В первом из равенств (6)  $\lambda_j = \lambda_j(\omega)$  ( $j = \overline{1; \infty}$ ) – собственное значение краевой задачи (1)-(4) содержащее частоту  $\omega$  асимметричных колебаний обрабатывающего механизма.

Рассмотрим и поставим обратную к (1)-(4) задачу, которая будет состоять в диагностировании жесткостей упругих опор при заданных значениях частот асимметричных колебаний обрабатывающего механизма.

#### Исследование существования и единственности решения обратной задачи

Для исследования существования решения поставленной обратной задачи преобразуем вековое уравнение (5) к виду

$$C_1 f_1(\lambda) + C_2 f_2(\lambda) + C_1 C_2 f_3(\lambda) + f_4(\lambda) = 0, \quad (7)$$

в котором

$$\begin{aligned} f_1(\lambda) &= -2\lambda \left( (\lambda^4 (k - m(\lambda^4 + k)) + k^2) \operatorname{sh} \frac{\lambda}{2} \sin \frac{\lambda}{2} + 6k^2 \left( \sin \frac{\lambda}{2} \operatorname{ch} \frac{\lambda}{2} + \cos \frac{\lambda}{2} \operatorname{sh} \frac{\lambda}{2} \right) \right); \\ f_2(\lambda) &= 6\lambda^8 \left( \sin \frac{\lambda}{2} \operatorname{ch} \frac{\lambda}{2} + \cos \frac{\lambda}{2} \operatorname{sh} \frac{\lambda}{2} \right); \quad f_3(\lambda) = -12\lambda^5 \operatorname{sh} \frac{\lambda}{2} \sin \frac{\lambda}{2}; \\ f_4(\lambda) &= \lambda^4 (\lambda^4 (k - m(\lambda^4 + k)) + k^2) \left( \sin \frac{\lambda}{2} \operatorname{ch} \frac{\lambda}{2} + \cos \frac{\lambda}{2} \operatorname{sh} \frac{\lambda}{2} \right). \end{aligned} \quad (8)$$

Итак, имеем спектральную задачу (1)-(4)  $L$  с вековым уравнением (7) и с краевыми условиями (упругими закреплениями) с безразмерными коэффициентами  $C_1$  и  $C_2$  (соответствующими размерными коэффициентами жесткостей  $c_1$  и  $c_2$ ) обоих валов.

Пусть с задачей  $L$  с вековым уравнением (7) существует еще одна спектральная задача – задача  $L'$  с подобным вековым уравнением

$$\mathcal{C}_1 f_1(\lambda_j) + \mathcal{C}_2 f_2(\lambda_j) + \mathcal{C}_1 \mathcal{C}_2 f_3(\lambda_j) + f_4(\lambda_j) = 0, \quad (9)$$

с другими коэффициентами  $\mathcal{C}_1$  и  $\mathcal{C}_2$  жесткостей.

**Теорема (о существовании решения обратной задачи).** Если корни  $\lambda_j = \lambda_j(\omega)$  ( $j = \overline{1; \infty}$ ) уравнений (7) и (9) задач  $L$  и  $L'$  равны с точностью до постоянной величины, то верны равенства:  $C_1 = \mathcal{C}_1$ ,  $C_2 = \mathcal{C}_2$ .

**Доказательство.** Вековые уравнения (7) и (9) спектральных задач линейно независимы, что можно показать численными программными расчетами. Кроме того (7) и (9) – целые функции от ненулевых собственных значений  $\lambda_j = \lambda_j(\omega)$  ( $j = 1; \infty$ ) [13]. Целые же функции по теореме Адамара определяются по их корням  $\lambda_j$  с точностью до множителей (до некоторой постоянной величины) [13]. Откуда имеем равенства для введенных безразмерных коэффициентов:  $C_1 = \bar{C}_1$ ,  $C_2 = \bar{C}_2$ . Теорема доказана.

Из теоремы следует, что коэффициенты жесткостей опор валов обрабатывающего механизма можно диагностировать единственным образом.

#### Алгоритм решения обратной задачи

Покажем теперь алгоритм поиска безразмерных коэффициентов жесткостей  $C_1$  и  $C_2$  при заданных значениях  $\lambda_j = \lambda_j(\omega)$  ( $j = 1; \infty$ ) краевой задачи. Пусть нам заданы (известны) значения  $\omega_j$  ( $j = 1, 2, 3$ ) частот асимметричных колебаний (а значит и собственных значений  $\lambda_j = \lambda_j(\omega)$  ( $j = 1, 2, 3$ )) обрабатывающего механизма.

Тогда при известных значениях  $\lambda_1 = \lambda(\omega_1)$ ,  $\lambda_2 = \lambda(\omega_2)$  имеем систему нелинейных уравнений относительно неизвестных  $C_1$  и  $C_2$ :

$$\begin{cases} C_1 f_1(\lambda(\omega_1)) + C_2 f_2(\lambda(\omega_1)) + C_1 C_2 f_3(\lambda(\omega_1)) + f_4(\lambda(\omega_1)) = 0, \\ C_1 f_1(\lambda(\omega_2)) + C_2 f_2(\lambda(\omega_2)) + C_1 C_2 f_3(\lambda(\omega_2)) + f_4(\lambda(\omega_2)) = 0. \end{cases} \quad (10)$$

Система (9) будет иметь отдельные две пары решений относительно ненулевых искомых параметров.

Аналогично, при известных значениях  $\lambda_1 = \lambda(\omega_1)$ ,  $\lambda_3 = \lambda(\omega_3)$ , имеем еще одну систему уравнений

$$\begin{cases} C_1 f_1(\lambda(\omega_1)) + C_2 f_2(\lambda(\omega_1)) + C_1 C_2 f_3(\lambda(\omega_1)) + f_4(\lambda(\omega_1)) = 0, \\ C_1 f_1(\lambda(\omega_3)) + C_2 f_2(\lambda(\omega_3)) + C_1 C_2 f_3(\lambda(\omega_3)) + f_4(\lambda(\omega_3)) = 0. \end{cases} \quad (11)$$

со своими двумя парами ( $C_1$ ;  $C_2$ ) решений.

Отметим, что общая пара значений ( $C_1$ ;  $C_2$ ) из решений систем (10) и (11) и будет являться единственной искомой парой по значениям безразмерных коэффициентов жесткостей механической системы. По найденной паре с учетом (6) определяются (также единственным образом) размерные жесткости упругих закреплений валов обрабатывающего механизма.

Алгоритм показывает, что для диагностирования жесткостей закреплений валов достаточно знание трех частот асимметричных колебаний механической системы.

#### Численный расчет по алгоритму решения задачи

По описанному алгоритму приведем численные расчеты, для которых используем функциональные команды математического пакета Maple.

Пусть заданы значения трех частот асимметричных колебаний обрабатывающего механизма и соответствующие им спектральные значения  $\lambda_1 = 10,8565$ ,  $\lambda_2 = 17,2457$ ,  $\lambda_3 = 23,5491$  при физических и геометрических параметрах механизма:

$$\begin{aligned} E_1 I_1 &= 0,1 \cdot 10^7 H \cdot m^2; \quad E_2 I_2 = 0,4 \cdot 10^7 H \cdot m^2; \quad \rho_1 = 234 \text{ кг} / \text{м}; \\ \rho_2 &= 57 \text{ кг} / \text{м}; \quad l = 2,1 \text{ м}; \quad B_2 = 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad c = 10^7 \text{ Н} / \text{м}. \end{aligned} \quad (12)$$

Определим значения жесткостей  $c_1$ ,  $c_2$  упругих опор валов обрабатывающего механизма.

Подставляя собственные значения  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$  и физические параметры (12) в равенства (8), найдем числовые значения функций, участвующих затем в системах (10) и (11):

$$\begin{aligned} f_1(\lambda_1) &= -2,01640 \cdot 10^{12}; \quad f_2(\lambda_1) = -1,29606 \cdot 10^{10}; \quad f_3(\lambda_1) = 1,55498 \cdot 10^8; \\ f_4(\lambda_1) &= 1,68065 \cdot 10^{14}; \quad f_1(\lambda_2) = 2,98968 \cdot 10^{15}; \quad f_2(\lambda_2) = 3,0469310^{12}; \\ f_3(\lambda_2) &= -3,65562 \cdot 10^{10}; \quad f_4(\lambda_2) = -2,49187 \cdot 10^{17}; \quad f_1(\lambda_3) = -1,14072 \cdot 10^{18}; \\ f_2(\lambda_3) &= -3,34812 \cdot 10^{14}; \quad f_3(\lambda_3) = 4,01699 \cdot 10^{12}; \quad f_4(\lambda_3) = 9,50779 \cdot 10^{19}. \end{aligned}$$

Тогда, с учетом последних равенств, система уравнений (10) примет вид:

$$\begin{cases} -2,01640 \cdot 10^{12} C_1 - 1,29606 \cdot 10^{10} C_2 + 1,55498 \cdot 10^8 C_1 C_2 + 1,68065 \cdot 10^{14} = 0, \\ 2,98968 \cdot 10^{15} C_1 + 3,0469310^{12} C_2 - 3,65562 \cdot 10^{10} C_1 C_2 - 2,49187 \cdot 10^{17} = 0. \end{cases}$$

Корни этой системы, найденные в математическом пакете:

$$(83,3490000; 12,5000000); (83,3491248; 82053,035447).$$

Система (11) тогда в числовом варианте следующая:

$$\begin{cases} -2,01640 \cdot 10^{12} C_1 - 1,29606 \cdot 10^{10} C_2 + 1,55498 \cdot 10^8 C_1 C_2 + 1,68065 \cdot 10^{14} = 0, \\ -1,14072 \cdot 10^{18} C_1 - 3,34812 \cdot 10^{14} C_2 + 4,01699 \cdot 10^{12} C_1 C_2 + 9,50779 \cdot 10^{19} = 0 \end{cases}$$

и будет иметь также две пары решений:

$$(83,3491101; 283999,08091); (83,3490000; 12,5000000).$$

Видим, что общим из решений обоих систем уравнений является пара  $(83,3490000; 12,5000000)$ , значит наши безразмерные коэффициенты жесткостей опор валов следующие:  $C_1 = 83,349$ ;  $C_2 = 12,5$ . Далее, с учетом (12), а также второго и третьего равенств из введенных параметров (6) получим размерные значения жесткостей опор валов:

$$c_1 = 0,9 \cdot 10^7 H/m; c_2 = 0,7 \cdot 10^8 H/m.$$

Таким образом, проведенные числовые расчеты подтверждают единственность диагностирования значений упругих закреплений валов обрабатывающего механизма по известным значениям трех частот его асимметричных колебаний.

Проверка численных расчетов с помощью прямой задачи (1)-(4) показывает, что восстановленные жесткости опор валов соответствуют заданным собственным значениям  $\lambda_1 = 10,8565$ ,  $\lambda_2 = 17,2457$ ,  $\lambda_3 = 23,5491$  при физических параметрах (11).

Отметим также, что численные расчеты дают аналогичные результаты и при других физических характеристиках обрабатывающего механизма, отличных от (11). Кроме того, расчеты, проведенные в математическом пакете Maple, показывают, что для такого алгоритма единственного восстановления (диагностирования) жесткостей закреплений валов можно рассматривать не только первые три подряд идущих собственных значений  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$ , а любые три значения из спектра частот колебаний механизма. Численные расчеты приведены здесь с точностью  $10^{-4}$ , в пакете Maple проводились с точностью до порядка  $10^{-20}$ .

### Заключение

Таким образом, в проведенном исследовании решена обратная спектральная задача по поиску жесткостей упругих опор валов обрабатывающего механизма по акустическому отклику: известным значениям частот асимметричных колебаний механизма.

Доказана единственность решения задачи с помощью еще одной введенной спектральной задачи с аналогичным частотным уравнением, но с отличными коэффициентами жесткостей. Предложен алгоритм решения обратной задачи, сведенный к поиску общей пары решения двух нелинейных систем относительно безразмерных коэффициентов жесткостей опор, от которых можно перейти к размерным значениям жесткостей. Приведен численный расчет к найденному алгоритму решения задачи диагностирования.

Приведенный алгоритм диагностирования жесткостей валов обрабатывающего механизма можно использовать для обеспечения качества обработки, а также для виброзащитной работы механизма путем соответствующих изменений в условиях упругих закреплений (в коэффициентах жесткостей опор) валов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахтямов А.М. Теория идентификации краевых условий и ее приложения. – М.: Физматлит, 2009. – 272 с.
2. Ватулян А. О. Обратные и некорректные задачи: Учеб. / А. О. Ватулян, О. А. Беляк, Д. Ю. Сухов, О. В. Явруян. Ростов н/Д: Изд-во Южного федерал. ун-та, 2011. – 232с.
3. Зубарев Ю. М. Динамические процессы в технологии машиностроения. Основы конструирования машин. – М.: Лань, 2021. – 212 с.
4. Гордон В.А., Потураева Т.В., Семенова Г.А. Собственные поперечные колебания балки, частично опертой на упругое основание. // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2015. № 6 (314). – С. 3-10.
5. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник в 3-х томах. Т.1 / Под ред. А. Биргера, Я.Г. Пановко. – М.: Машиностроение, 1983. – 415 с.
6. Ahmadian H., Mottershead J. E., Friswell M. I. Boundary condition identification by solving characteristic equation // J. Sound Vibrat. – 2001. № 247. – S. 755-763.
7. Hung-Jen Liu, Nien-Sheng Hsu, Tim Hau Lee. Simultaneous identification of parameter, initial condition, and boundary condition in groundwater modelling // Hydrol. Process. – 2009. № 23. – S. 2358-2367.
8. Галаев В.И. Свободные колебания двух валов с упругой связью / В.И. Галаев, Ю.В. Кулешов, А.Ю. Тарасов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 1997. Т. 3, № 3. – С. 311-314.
9. Маслов Г.С. Расчеты колебаний валов / Г.С. Маслов. – М.: Машиностроение, 1981. – 456 с.

10. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний. – М.: Ленанд, 2017. – 416 с.
11. Сафина Г.Ф., Кириллова Е.А. Акустическое восстановление коэффициентов жесткости упругих несимметричных балочных опор нераскрученного ротора // Физическое образование в ВУЗах. 2024. – Т. 30. № 1. – С. 77-80.
12. Сафина Г.Ф. Единственность и корректность решения задачи сохранения частот поперечных колебаний трубопровода с жидкостью на шарнирных опорах // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2022. № 3 (353). – С. 9-14.
13. Ланкастер П. Теория матриц: Пер. с англ. – М.: Наука, 1982. – 272 с.

**Сафина Гульнара Фриловна**

Нефтекамский филиал ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»,  
Кандидат физико-математических наук, доцент,  
декан экономико-математического факультета,  
452680, Республика Башкортостан, г. Нефтекамск, ул. Трактовая, д.1.  
Тел. 8(917) 40-399-79  
E-mail: safinagf@mail.ru

G.F. SAFINA

## DIAGNOSTICS OF RIGIDITY OF SUPPORTS OF SHAFTS OF PROCESSING MECHANISM BY FREQUENCIES OF ITS ASYMMETRIC OSCILLATIONS

**Abstract.** The paper examines the problem of diagnosing the stiffness of the supports of a mechanism of two elastically coupled shafts, which is the basis of any processing dynamic system. The theorem on the existence and uniqueness of the solution of the posed inverse problem is formulated and proved. An algorithm for solving the problem is presented, which confirms the uniqueness of diagnosing the stiffness of the supports of the mechanism, showing the sufficiency of using three values from the frequency spectrum of asymmetric oscillations of the processing system. The solution algorithm includes numerical calculations using functional commands and built-in libraries of the Maple mathematical package, confirming theoretical conclusions and algorithms.

**Keywords:** processing system, diagnostics, axisymmetric oscillations, frequency equation, uniqueness, stiffness coefficients, solution algorithm.

## BIBLIOGRAPHY

1. Akhtyamov A.M. Theory of identification of boundary conditions and its applications. – М.: Fizmatlit, 2009. – 272 s.
2. Vatulyan A. O. Inverse and incorrect tasks: Study./A. O. Vatulyan, O. A. Belyak, D. Yu. Sukhov, O. V. Yavruyan. Rostov n/a: Publishing house of the Southern Federal. University, 2011. –232 s.
3. Zubarev Yu. M. Dynamic processes in mechanical engineering technology. Fundamentals of machine design. – М.: Doe, 2021. – 212 s.
4. Gordon V.A., Poturaeva T.V., Semenova G.A. Intrinsic transverse vibrations of a beam partially resting on an elastic base.//Fundamental and applied problems of technology and technology. – 2015. № 6 (314). – S. 3-10.
5. Strength, stability, fluctuations. Reference book in 3 volumes. T.1/Ed. A. Birger, Ya.G. Panovko. - М.: Mechanical Engineering, 1983. – 415 s.
6. Ahmadian H., Mottershead J. E., Friswell M. I. Boundary condition identification by solving characteristic equation // J. Sound Vibrat. – 2001. № 247. – S. 755-763.
7. Hung-Jen Liu, Nien-Sheng Hsu, Tim Hau Lee. Simultaneous identification of parameter, initial condition, and boundary condition in groundwater modelling // Hydrol. Process. – 2009. № 23. – S. 2358-2367.
8. Galaev V.I. Free oscillations of two shafts with elastic coupling/V.I. Galaev, Yu.V. Kuleshov, A.Yu. Tarasov//Westn. Tamb. state technical University. – 1997. T. 3, NO. 3. – S. 311-314.
9. Maslov G.S. Shaft vibration calculations/G.S. Maslov. – М.: Mechanical Engineering, 1981. – 456 s.
10. Biderman V.L. Theory of mechanical oscillations. – М.: Lenand, 2017. – 416 s.
11. Safina G.F., Kirillova E.A. Acoustic restoration of stiffness coefficients of elastic asymmetric beam supports of an untwisted rotor//Physical education in universities. 2024. – Т. 30. № 1. – S. 77-80.
12. Safina G.F. Uniqueness and correctness of solving the problem of maintaining the frequencies of transverse vibrations of the pipeline with liquid on hinged supports // Fundamental and applied problems of technology and technology. – 2022. № 3 (353). – S. 9-14.
13. Lancaster P. Matrix theory: Per. from English – М.: Science, 1982. – 272 s.

**Safina Gulnara Frilovna**

Ph.D., associate professor

«Ufa University of Science and Technology» Neftekamsk branch, Dean of the faculty «Economics and mathematics», 452680, Bashkortostan, Neftekamsk, Traktovaya, 1.

Ph.: 8(917) 40-399-79

E-mail: safinagf@mail.ru

© Г.Ф. Сафина, 2024

Я.Н. ГАЙНУЛЛИНА

## РАБОТА УПРУГО – ПЛАСТИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК В СОСТОЯНИИ ПРЕДЕЛЬНОГО РАВНОВЕСИЯ ПРИ ГЛУБОКОВОДНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

**Аннотация.** В работе рассматриваются проблемы повышения долговечности глубоководного оборудования, в частности, аппаратов жидкостного дыхания замкнутого цикла. Среди компонентов и систем данных аппаратов наиболее уязвимыми элементами являются тонкостенные упруго - пластичные полимерные оболочки, которые при комплексном нагружении могут терять устойчивость, что приводит к выходу из строя аппарата в целом.

**Ключевые слова:** аппарат жидкостного дыхания, устойчивость, биологический объект, упруго – пластичные оболочки.

### Введение

Зачастую, при исследовании напряжённо – деформированного состояния тонких цилиндрических оболочек, изготовленных из полимерных материалов, делаются допущения о физической линейности и независимости от времени механических свойств конструкционных материалов тел оболочек [1,2]. Однако, развитие общей теории оболочек, направленное на рациональное проектирование данных изделий, значительно сократило область упомянутых допущений. Как результат, резко выросла необходимость в подробном изучении неупругого поведения оболочек, работающих в реальных условиях подводных исследований. Для адекватного описания неупругого поведения оболочек ранее [3,4] были установлены физически обоснованные и математически достоверные модели определяющих уравнений для новых конструкционных материалов, используемых в этой области техники. Данный математический аппарат описывает такие разновидности неупругих явлений, как пластическое течение, релаксация или ползучесть. Напряжённое состояние тонких цилиндрических полимерных оболочек (например – эндотрахеальные трубы или шланговые вставки для прокачки дыхательных жидкостей) характеризуется изгибающими моментами, распределёнными касательными силами и мембранными усилиями [5].

### Основная часть

Иногда целесообразно оперировать величинами, эквивалентами силам, которые представляют собой величины результирующих напряжений. На рисунке 1 показан пример распространённого варианта потери устойчивости гибкой оболочки.



Рисунок 1 - Вариант пластической деформации гибкой оболочки при комплексном нагружении

Повышение устойчивости упруго – пластических оболочек, а так же увеличение их способности воспринимать многократные циклические усилия изгиба, кручения, растяжения и радиального сжатия, являются одним из определяющих факторов, влияющих на долговечность элементов глубоководных систем специального назначения. Особое внимание следует обратить на комбинации величин внутреннего и внешнего распределённого давления, действующего на длинномерные полимерные оболочки. Для качественной и количественной оценки знакопеременных усилий, действующих на всей длине гибких оболочных элементов, необходимо использовать фундаментальные положения деформационной теории пластичности, в соответствии с которой компоненты девиатора напряжений

пропорциональны компонентам совокупных деформаций [6,7]. Для наших конкретных условий работы системы жидкостного дыхания на больших глубинах, соответствующие связи между деформациями и напряжениями могут быть записаны в следующем виде:

$$G_{\alpha\beta} = A(\varepsilon_{\alpha\beta} + \varepsilon_\gamma \delta_{\alpha\beta}) \text{ (при } \alpha, \beta = 1, 2, \dots \text{)}, \quad (1)$$

где параметр  $A = (S_{ij}^2/e_{ij}^2)^{\frac{1}{2}}$ , где  $(i, j = 1, 2, \dots)$ .

Предположив, что изменение объема внутренней полости оболочки является упругим, а процесс нагружения и изменения нагрузок считается произвольно переменным, будем иметь:

$$S_{ij} = 2G \left(1 - \frac{\varphi}{2G}\right) e_{ij} = \Psi e_{ij}, \sigma_{ij} = 3K \varepsilon_{ij}. \quad (2)$$

Поскольку снижение рабочих нагрузок происходит плавно, то  $S_{ij} = 2G e_{ij}$ , при условии, что

$$dS_{ij}^2 < 0. \quad (3)$$

Определенное влияние на итоговую долговечность системы гибких оболочек аппарата жидкостного дыхания имеет т.н. история деформационных процессов и соотношение циклов нагружения и разгрузки. Это понятие выходит в фундаментальные уравнения в виде инварианта  $e_{ij}^2$ .

В случае применения традиционных технологий изготовления длинномерных пластиковых оболочек из распространенных материалов (полиамид, капролактон, полиэтилен высокого давления и т.д.), к обычным теоретическим положениям необходимо добавлять условие потенциальной текучести [8]. Обычно условие текучести определяется непрерывной и регулярной функцией инвариантов напряжений, а именно, критерием Губера – Мизеса. По данному критерию функция текучести линейно зависит от инварианта девиатора напряжений. Можем полагать, что соотношения между напряжениями и деформациями при учёте условия текучести приобретают следующий вид:

$$\sigma_{\alpha\beta} = \sigma_0 (0,67 e_{ij}^2)^{0,5} (\varepsilon_{\alpha\beta} + \varepsilon_{\gamma\gamma} \delta_{\alpha\beta}). \quad (4)$$

Следует заметить, что напряжения выражают через деформации и константу текучести  $\sigma_0$ , без учёта деформационного упрочнения материала оболочки.

Запишем найденные ранее зависимости деформаций и результирующих сил, характерных для средней линии тела оболочки в виде:

$$N_{\alpha\beta} = (\lambda_{\alpha\beta} + \lambda_{\gamma\gamma} \delta_{\alpha\beta}) I_1 + (\chi_{\alpha\beta} + \chi_{\gamma\gamma} \delta_{\alpha\beta}) I_2, \quad (5)$$

$$M_{\alpha\beta} = (\lambda_{\alpha\beta} + \lambda_{\gamma\gamma} \delta_{\alpha\beta}) I_2 + (\chi_{\alpha\beta} + \chi_{\gamma\gamma} \delta_{\alpha\beta}) I_3, \quad (6)$$

где  $I_s = G_0 \left(\frac{2}{3}\right)^{1/2} \int_{-H}^H (e_{ij}^2)^{0,5} \chi_3^{s-1} dx_3$ ; ( $S = 1, 2, 3$ ).  $(7)$

Данные выражения, в совокупности с уравнениями равновесия и соотношениями между  $\lambda_{\alpha\beta}$ , а так же величиной вектора перемещений  $u_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) формируют систему уравнений математической теории упруго пластических оболочек, решение которой требует учёта строго заданных граничных условий.

Если из вышеприведенных выражений (5) и (6) удалить переменные кинематические параметры, то они будут представлять собой описание поверхности текучести оболочки в параметрическом виде. Методика расчета для длинномерных цилиндрических оболочек, отвечающих условиям Губера – Мизеса впервые была получена А.А. Ильюшиным [9]. Далее, очевидно, что изгибающие и мембранные факторы не разделяются, как это характерно для линейных вязко – упругих оболочек. Это обстоятельство усложняет получение точных результатов расчётов. Для нашего случая характерным является тот факт, что мембранные усилия влияют на удлинение оболочки, а изгибающие моменты вызывают искривление линии срединной поверхности данного изделия.

В основе математического аппарата упруго – пластической теории оболочек лежат вариационные методы и метод последовательных приближений. Необходимо исследовать сходимость метода применяемых решений. В основе вариационных методов решений лежит предположение, что вариация полной внутренней энергии  $W$  равна работе  $L$  внешних сил  $T_i$  совершенной на вариации перемещений  $u_i$ . Плотность полной внутренней энергии для зависимости (связи) между напряжениями и деформациями имеет вид:

$$W = \int_0^{e_{ij}} A e_{ij} d e_{ij} + 1,5 K \varepsilon_k \varepsilon_{ij}, \quad (8)$$

где  $W$  – потенциал напряжений,

$A$  – параметр, устанавливающий связь величин  $G$  и  $\varphi$ .

Тогда вариационная теорема позволяет считать, что

$$\delta \int_v^\infty W dv = \int_s^\infty T_i \delta u_i ds, \quad (9)$$

без учёта массы конструкции в целом [10].

Если предположить, что компоненты перемещений возрастают пропорционально параметру  $\mu$ , то выражение (9) устанавливает для этого параметра следующую зависимость:

$$\int A_1 (M_{\alpha\beta} \chi_{\alpha\beta} + N_{\alpha\beta} \lambda_{\alpha\beta}) ds - \mu \int T_i u_i ds \rightarrow \min, \quad (10)$$

где  $A_1$  параметр, зависящий от величины  $A$ , найденной методом Ритца.

При работе с теорией малых упруго – пластических деформаций необходимо выполнять основное условие, по которому главные оси при деформации оболочки должны оставаться стабильно фиксированными [11].

В процессе решения задачи упруго – пластического деформирования оболочки, рассматривалась условно бесконечная пластиковая цилиндрическая оболочка радиусом  $R$  с толщиной стенок  $2H$ , нагруженная внешним распределенным давлением  $P$  и конечной осевой силой. В принятой цилиндрической системе координат  $(r, \varphi, x)$  соотношения между деформациями и перемещениями имеют следующий вид:

$$\lambda_x = f(x), \chi_x = \frac{d^2 \omega}{dx^2} = \omega'', \lambda_\varphi = \frac{\omega}{R}, \chi_\varphi = 0, \quad (11)$$

где  $\omega$  – радиальное перемещение.

Если на определённом этапе глубоководных экспериментов осевые силы обнуляются (система разгружена), то из ранее приведенных зависимостей следует, что

$$N_x = I_1 (2\lambda_x + \lambda_\varphi) + 2\chi_x I_2 = 0, \quad (12)$$

где  $\lambda_x = -\frac{\lambda_\varphi}{2}$  и  $I_2 = 0$ .

Кроме того, учитывая, что для наших условий характерным является теоретическая несжимаемость, будем иметь  $\varepsilon_x + \varepsilon_\varphi + \varepsilon_r = 0$ , а значит из выражения (11) можем получить следующее:

$$e_{ij}^2 = 2(\varepsilon_x^2 + \varepsilon_\varphi^2 - \varepsilon_x \varepsilon_\varphi) = 2(0.75\lambda_\varphi^2 + x_3^2 \chi_x^2) = 2(\frac{3\omega}{4R} + x_3^2 \omega''). \quad (13)$$

Кроме того, зависимость между напряжениями и деформациями может быть записана как:

$$\sigma_{\alpha\beta} = 2G(1 - \omega)(\varepsilon_{\alpha\beta} + \varepsilon_{\gamma\gamma} \delta_{\alpha\beta}), \quad (14)$$

где  $\omega = \varphi/2G$  представляет собой отклонение от линейности для традиционных полимерных материалов оболочки. Для материалов, подчиняющихся условию Губера – Мизеса, можно записать:

$$\omega = (1 - k_0/2G) \sqrt{0.75\lambda_\varphi^2 + \chi_x^2 \chi_\varphi^2}, \text{ для } e_{ij}^2 \geq k_0^2/2G^2 \quad (15)$$

где  $k_0$  – предел текучести. После дальнейших преобразований получим следующие равенства:

$$N_\varphi = 2G \left( \frac{3\omega H}{R} \right) + \delta N_\varphi, \quad (16)$$

$$M_x = 2G \left( \frac{4H^3 \omega''}{3} \right) + \delta M_x, \quad (17)$$

где  $\delta N_\varphi, \delta M_x$  – уточнение соотношений, устанавливающих связь между результирующими силами и перемещениями, вызванное вероятной нелинейностью процесса.

Например, для чисто пластического состояния имеем:

$$I_1 = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_{-H}^H \frac{dx_3}{\sqrt{0.75 \lambda_\varphi^2 + \chi_x^2 \chi_\varphi^2}} = \frac{\sigma_0}{\omega \sqrt{3}} e_n \frac{1 + \sqrt{\Psi^2 + 1}}{1 - \sqrt{\Psi^2 + 1}}, \quad (18)$$

$$I_3 = \omega'' H^2 \sqrt{\Psi^2 + 1} - \frac{1}{2} \Psi^2 H^2 I_1, \quad (19)$$

где  $\Psi = 3\omega^2/4(\omega'')^2 R^2 H^2$ .

Определив ранее величины  $N_\varphi$  и  $M_x$ , найденные через радиальные перемещения сечений оболочки, можем записать уравнение равновесия в виде:

$$\frac{d^4 \omega}{dx^4} + \alpha \omega = \beta \rho + \gamma_1 \delta N_\varphi + \gamma_2 \frac{d^2 \delta M_x}{dx^2}, \quad (20)$$

где  $\alpha, \beta, \gamma_1, \gamma_2$  – некоторые постоянные величины.

Если  $\omega = 0$ , то  $\delta M_x = \delta N_\varphi = 0$ . В случае локально действующей нагрузки можно записать процедуру определения результирующих сил через перемещения:

$$\frac{N_\varphi}{2G_0 H} = \frac{\Psi}{2} l_n \frac{1 + \sqrt{\Psi^2 + 1}}{1 - \sqrt{\Psi^2 + 1}}, \quad (21)$$

$$\frac{M_x}{G_0 H^2} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{N_\varphi}{G_0 H} \Psi - 2\sqrt{\Psi^2 + 1}. \quad (22)$$

Метод определения малых и локальных упруго – пластических деформаций имеет особое значение при изучении реального процесса пластической деформации оболочки. Интерес представляет количественная оценка на величины перемещений на ранней стадии деформативного процесса [12,13].

Существуют эффективные средства выявления критической потери устойчивости оболочек, считающихся упруго – пластическими. Основную сложность здесь представляет выявление докритического состояния оболочки и локализация опасных зон. Достоверными и применимыми в решении практических задач, являются методы, учитывающие случаи, когда закритическое состояние длинномерной пластиковой оболочки считается однородным [14]. В том случае, если деформационные нагрузки являются переменными и не достигают уровня предельных, их определение существенно упрощается поскольку уравнения равновесия системы имеют в этом варианте линейный характер. В математическом аппарате анализа поведения упруго – пластических оболочек имеется целый ряд унифицированных теоретических положений, например, теория Власова – Муштари, Кирхгофа – Лява или теория Койтера – Будянского, которые учитывают скорость деформации оболочки, что является их несомненным достоинством. Решаемая задача поведения гибкой длинномерной оболочки рассматривается в допущении независимости внешних сил от перемещений. Применяемый для этого случая термин «стоп – нагрузка» в случае бифуркации т.е. появления (новых качественных изменений в движении динамической системы при малых деформативных отклонениях её параметров, является условным [15,16]. Результаты применения в расчётах данных теоретических положений являются достаточно точными для практического использования в глубоководных экспериментах.

### Заключение.

Длинномерные гибкие цилиндрические оболочки, являющиеся компонентом систем аппаратов жидкостного дыхания замкнутого цикла, подвергаются ряду силовых и физико – химических факторов, существенно влияющих на их долговечность. Так, при проведении глубоководных испытаний аппаратов в Чёрном море, на оболочки действовала морская вода с высоким содержанием сероводорода (с внешней стороны) и варианты различных дыхательных экспериментальных жидкостей (карбогал, перфторуглерод, перфтордекалин, перфлуброн и т.д.) с внутренней стороны. Воздействие столь разнообразных жидких сред внесло свои трудности и особенности в расчёт оболочек, т.к. их воздействие не ограничивается поверхностным влиянием, а имеет объёмный характер. Замечено, что жидкие среды могут диффундировать в толщу некоторых полимерных материалов, изменяя их химический состав и вызывая набухание. Причём скорость диффузии мала, непостоянна, продолжается весь срок эксплуатации изделия и трудно поддаётся учёту в прочностных расчётах. Уравнения массопереноса нелинейны и зависят от полей напряжений. В работе сделана попытка подойти к методологии алгоритма расчётов, определить последовательность их этапов, что представляется важным в практическом приложении.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бленд Д.Р. Теория линейной вязко - упругости – М.: Мир, 1985. – 199 с.
2. Гольденблат И.И. Ползучесть и несущая способность оболочек / И.И. Гольденблат, Н.А. Николаенко – М.: Госстройиздат, 1980. – 256 с.
3. Гольденвейзер А.Л. Теория упругих тонких оболочек – М.: Госстройиздат, 1980. – 512 с.
4. Койтер В.Т. Общие теоремы теории для упруго – пластических тел – М.: Изд. иностр. лит, 1981. – 79 с.
5. Новожилов В.В. Теория тонких оболочек – Л.: Судпромизд, 1982. – 213с.
6. Терегулов И.Г. Ползучесть в краевых зонах тонких оболочек – М.: Наука, 1970. – 206 с.
7. Ерхов М.И. Конечные соотношения между осевыми силами и изгибающими моментами оболочек // Строительная механика и расчёт сооружений №3, 1980.
8. Хилл Р. Математическая теория пластичности – М.: Гостехиздат, 1976. – 407 с.
9. Керимбаев И.Д. Соотношение между результирующими усилиями, моментами и деформациями при сложном нагружении // Вестник МГУ. – Москва. – 1963. – №1.
10. Листрова Ю.П. О несущей способности цилиндрической оболочки для критерия текучести максимального приведенного напряжения // Механика и машиностроение – Москва: Известия АН СССР. – 1963. – № 2.
11. Гайнуллина Я.Н. Оценка деформативности элементов глубоководных систем при сложном нагружении / Я.Н. Гайнуллина, М.И. Калинин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологий. – Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева. – 2023. – № 4(360) – С. 16 – 24.

12. Гайнуллина Я.Н. Особенности проектирования глубоководных оболочек для аппаратов жидкостного дыхания / Я.Н. Гайнуллина, М.И. Калинин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева. – 2024. – № 1(360) – С. 16 – 24.
13. Савчук А.А. Неупругое поведение оболочек / А.А. Савчук, В.К. Ольшук – М.: Мир, 1969. – 343 с.
14. Ключников В.Д. Устойчивость упруго пластических систем – М.: Наука, 1980. – 240 с.
15. Степанов Р.Д. Расчёты на прочность конструкций из пластмасс, работающих в жидкких средах / Р.Д. Степанов, О.Ф. Шленский – М.: Машиностроение, 1981. – 137 с.
16. Колтунов М.А. Прочностные расчёты изделий из полимерных материалов / М.А. Колтунов, В.П. Майборода, В.Г. Зубчанинов – М.: Машиностроение, 1983. – 239 с.

**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

---

Ya.N. GAINULLINA

## **THE OPERATION OF ELASTIC – PLASTIC SHELLS IN A STATE OF EXTREME EQUILIBRIUM DURING DEEP-SEA EXPERIMENTS**

**Abstract.** The paper considers the problems of increasing the durability of deep-sea equipment, in particular, closed-loop liquid breathing apparatus. Among the components and systems of these devices, the most vulnerable elements are thin-walled elastic - plastic polymer shells, which, under complex loading, can lose stability, which leads to the failure of the device as a whole.

**Keywords:** liquid respiration apparatus, stability, biological object, elastic – plastic shells.

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Blend D.R. Teoriya lineynoy vyazko – uprugosti – М.: Mir, 1985. – 199 с.
2. Gol'denblat I.I. Polzychest' I nesushchaya sposobnost' obolochek / I.I. Gol'denblat, N.A. Nikolaenko – М.: Gostroyizdat, 1980. – 256 с.
3. Gol'denveyzer A.L. Teoriya yprugikh obolochek – М.: Gostroyizdat, 1980. – 512 с.
4. Koyter V.T. Obshchie toeremi teorii dlya uprugo – plasticheskikh tel – М.: Izd. inostr. lit, 1981. – 79 с.
5. Novozhilov V.V. Teoriya tonkikh obolochek – L.: Sudpromizdat, 1982. – 213s.
6. Teregylov I.G. Polzychest' v kraevikh zonakh tonkikh obolochek – М.: Nayka, 1970. – 206 с.
7. Erkhov M.I. Konechnie sootnosheniya mazhdy osevimi silami i izgibaushchimi momentami obolochek // Stroitel'naya mekhanika i raschet sooryzheniy №3, 1980.
8. Khill R. Matematicheskaya teoriya plastichnosti – М.: Gostekhizdat, 1976. – 407 с.
9. Kerimbaev I.D. Sootnoshenie vezhdu rezyl'tiryushchimi ysiliyami, momentami i deformatciyami pri slozhnom nagryzhenii // Vestnik MGY. – Moskva. – 1963. – №1.
10. Listrova Yu.P. O nesyshchey sposobnosti tcelindricheskoy obolochki dlya kriteriya tekychesti maksimal'nogo privedenного napryazheniya // Mekhanika i mashinostroenie – Moskva: Izvestiya AN SSSR. – 1963. – № 2.
11. Gaynullina Ya.N. Otsenka deformativnosti elementov glybokovodnikh sisnem pri slozhnom nagryzhenii / Ya.N. Gaynullina, M.I. Kalinin // Fyndamental'nie I prikladnie problem tekhniki i tekhnologii. – Orel: OGY im. I.S. Tergeneva. – 2023. – № 4(360) – S. 16 – 24.
12. Gaynullina Ya.N. Osobennosti proektirovaniya glybokovodnikh obolochek dlya apparatov zhidkostnogo dikhaniya / Ya.N. Gaynullina, M.I. Kalinin // Fyndamental'nie I prikladnie problem tekhniki i tekhnologii. – Orel: OGY im. I.S. Tergeneva. – 2024. – № 1(360) – S. 16 – 24.
13. Savchuk A.A. Neyprygoe povedenie obolochek / A.A. Savchuk, V.K. Ol'shchuk – М.: Mir, 1969. – 343 с.
14. Kluashnikov V.D. Ustoychivost' uprugo plasticheskikh sistem – М.: Nayka, 1980. – 240 с.
15. Stepanov R.D. Rascheti na prochnost' konstrukciy iz plastmas, rabotaushchikh v zhidkikh sredakh / R.D. Stepanov, O.F. Shlenskiy – М.: Mashinostroenie, 1981. – 137 с.
16. Koltynov M.A. Prochnostnie rascheti izdeliy iz polimernikh materialov / M.A. Koltynov, V.P. Mayboroda, V.G. Zybchaninov – М.: Mashinostroenie, 1983. – 239 с.

**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

# **МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ**

УДК 621.9

DOI: 10.33979/2073-7408-2024-365-3-31-39

О.Г. КОЖУС, Г.В. БАРСУКОВ, А.Л. ГАЛИНОВСКИЙ,  
Т.А. ЖУРАВЛЕВА, Е.А. ТИНЯКОВА, В.Ю. ПРЕСНЕЦОВА

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИЖЕНИЯ АБРАЗИВНЫХ ЧАСТИЦ В СОПЛЕ ГИДРОАБРАЗИВНОГО СТАНКА С ПАВ**

**Аннотация.** В статье предложена модель взаимодействия слоя ПАВ с жидкостью, что позволяет сделать качественный вывод о влиянии ПАВ на значение вязкости поверхности слоя, контактирующего с ним потока жидкости. Представлены результаты моделирования движения абразивных частиц в модифицированном ПАВ потоке жидкости в канале сопла, что позволяет прогнозировать влияние концентрации молекул ПАВ на износ сопла и производительность гидроабразивного резания.

**Ключевые слова:** поверхностно-активные вещества, резание, абразив, моделирование

### **Введение**

Гидроабразивный станок предназначен для резки различных материалов абразивными частицами при высоких давлениях. Интерес к технологии гидроабразивного резания (ГАР) связан с тем, что возможно обрабатывать как хрупкие, высокопрочные, так и пластичные материалы без термического воздействия.

Объем мирового рынка станков для гидроабразивной резки оценивается 1 098,90 млн. долларов в 2022 году и, по прогнозам, достигнет 1 986,40 млн. долларов к 2030 году, увеличиваясь в среднем на 6,1 % ежегодно [1].

Исследованию протекающих процессов при гидроабразивном резании посвящено много публикаций [2 – 4]. Барзов А.А., Галиновский А.Л. провели численные расчеты процесса резания в двумерной и трехмерной постановках с привлечением методов акустической эмиссии [5]. Бурнашов М.А. предложил повышать эффективность разрезания листовых неметаллических материалов водоледяными струями высокого давления [6]. Повышение эффективности достигается за счет добавления в сверхзвуковую струю воды жидкого азота. С целью увеличения режущей способности инструмента Шпилевым В.В. предложено закручивать струю за счет нарезания спиралевидной канавки в фокусирующей трубке гидроабразивной головки [7]. Автор показывает, что «сверлильный» эффект приводит к повышению режущей способности струи, а также за счет работы центростремительной силы происходит концентрация абразивных частиц на ее оси. Sitek, L., Hlaváček V. и др. основное внимание уделяют исследованию эффектов влияния пульсирующей абразивной струи воды на скорость резки с использованием стандартной абразивной инжекционной режущей головки [8].

В своих исследованиях Погребняк А.В. показывает, что длину начального участка струи можно увеличить посредством добавления в рабочую среду водорастворимых полимеров, в качестве которых он использовал карбоксиметилцеллюлозу, глицерин, поливиниловый спирт, полиоксиэтиленгликоль, полиакриламид, полиоксиэтилен. Автор подтверждает, что полимерные добавки существенно стабилизируют струю, при этом уменьшается угол конусности внешних границ струи, увеличивается длина начального участка по сравнению со струей чистой воды [9].

Введение в поток жидкости с абразивом весьма малых добавок поверхностно-активных веществ (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. 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.

Сложность химического состава и атомно-молекулярной структуры взаимодействующих сред делает решение задачи влияния ПАВ на динамику струи методами физики твердого тела трудно выполнимой. Избежать этих трудностей в определенной степени можно методами механики сплошных сред. Возможность использования этих методов для решения задачи описания влияния ПАВ на вязкость полярной жидкости (воды) вблизи твердой поверхности следует из следующих рассуждений.

При описании движения вязкой ньютоновской жидкости вдоль твердой стенки обычно, независимо от физической природы материалов этих объектов, используются два допущения. Первое состоит в том, что жидкость прилипает к твердой поверхности [10, 11]. Обсуждается вопрос о том, что жидкость при движении не только прилипает к твердой стенке, но и скользит по воздушной подушке между соседними элементами шероховатости, за счет чего уменьшается суммарное трение. Скольжению жидкости на супергидрофобной поверхности посвящен обзор [12].

Вторым допущением для ньютоновской жидкости является предположение о независимости величины коэффициента вязкости от расстояния точки ее определения от твердой поверхности [11]. Это допущение находится в противоречии с экспериментальными данными, представленными в работах [13, 14]. Эти данные свидетельствуют о том, что средняя по сечению вязкость протекающей по капилляру жидкости зависит от диаметра капилляра. Это свидетельствует о том, что на величину местного значения вязкости влияют свойства как самой жидкости, так и материала канала. При этом свойства материала проявляются на незначительном, но конечном расстоянии от стенки [15].

Это явление теоретически можно было бы описать на основании физики жидкого состояния [16]. Однако представленные в этой работе попытки теоретического расчета коэффициента вязкости жидкости даже вдали от твердой поверхности нельзя использовать в практических условиях. Имеются попытки описать это явление в рамках механики жидких сред путем отказа от классической модели ньютоновской жидкости и применения модели микрополярной жидкой среды [17].

В данной работе для объяснения изменения вязкости предлагается отказ от второго допущения, лежащего в основе классической модели течения вязкой жидкости вдоль твердой стенки. При этом причиной изменения вязкости предлагается считать определенное сочетание свойств стенки и жидкости. Критерий этого изменения строится методами нелокальных взаимодействий частиц материалов стенки и жидкости, рассматриваемых как континуумы.

Сопло гидроабразивного станка важный компонент оборудования ГАР, оказывающее существенное влияние на общие производственные показатели и имеет большое значение для достижения требуемого качества обработки. Поэтому лучшее понимание влияния добавок полимеров и ПАВ на кинематику и движение абразивных частиц будет способствовать повышению эффективности ГАР. Проведение экспериментов по изучению трех фаз потоков внутри сопла является сложной задачей. Измерение сложных многофазных потоков внутри микросопла в ряде случаев даже невозможно выполнить. С развитием вычислительных возможностей численное моделирование этих сложных внутренних потоков стало возможным, что обеспечивает получение необходимых знаний о механизмах многофазного взаимодействия в сопле при введение различных модифицирующих добавок.

### 1. Теоретическое описание взаимодействия слоя ПАВ с жидкостью

При моделировании этого взаимодействия предполагается, что два полубесконечных тела  $B_{(1)}$  и  $B_{(2)}$ , контактирующие вдоль плоскости  $A_{(12)}$  подвержены взаимной адгезии. Это означает, что каждая макрочастица  $d B_{(1)1}$  тела  $B_{(1)}$  взаимодействует с каждой макрочастицей  $d B_{(2)1}$  тела  $B_{(2)}$  - при учете парных взаимодействий, и с каждой парой  $d B_{(2)1}$  и  $d B_{(1)2}$  того же тела – при учете тройных взаимодействий, и наоборот. Суммарная энергия адгезии тел  $B_{(1)}$  и  $B_{(2)}$  равна изменению их свободной энергии, произошедшему в изотермическом обратимом процессе вступления их в адгезионное взаимодействие. Считается, что если она оказалась положительной, то адгезия есть – тела притягиваются друг к другу. В противном случае адгезии нет.

В работе [18] рассмотрен только частный пример адгезии, на базе которого исследуется соотношение ролей парных и тройных взаимодействий в появлении адгезии или наоборот – отталкивании тел  $B_{(1)}$  и  $B_{(2)}$ . В данной работе представляет интерес второй случай.

Для упрощения математических рассуждений и повышения наглядности их результатов считается, что силы адгезии со стороны тела  $B_{(2)}$  на частицы  $d B_{(1)} \subset B_{(1)}$  ориентированы перпендикулярно плоскости адгезионного контакта  $A_{(12)}$ :  $x \equiv x_{(1)} = x_{(2)} = 0$  тел  $B_{(1)}$  и  $B_{(2)}$  и зависят только от расстояния  $x \equiv x_{(1)}$  от  $A_{(12)}$  до слоя  $\delta B_{(1)} \subset B_{(1)}$ , параллельного  $A_{(12)}$  толщиной  $d x \equiv d x_{(1)}$ , в котором они лежат  $d B_{(1)} \subset \delta B_{(1)}$ . (Здесь  $x \equiv x_{(1)}, x_{(2)}$  - расстояния, отсчитываемые от плоскости контакта в глубину тела с соответствующим номером)

Учитывая это, взаимодействующие тела можно мысленно разделить на цилиндрические части одинакового бесконечно малого сечения, перпендикулярные плоскости контакта  $A_{(12)}$ :  $x = 0$ . Так что учитываются только те силы взаимодействия, которые возникают между частицами разных материалов, принадлежащих соосным цилиндрам.

Получено выражение, которое определяет распределение объемной плотности потенциальной энергии взаимодействия бесконечно тонкого цилиндра из тела  $B_{(2)}$  и частицы  $d B_{(1)}$ , расположенной на расстоянии  $x$  от поверхности контакта.

$$w(\xi) = \left( \frac{\Phi_{0(12)}^{(2)}}{\beta_{(12)}^3} \right) \left( 2e^{-\xi} - \frac{1}{2}e^{-2\xi} \right) + \left( \frac{\Phi_{0(122)}^{(3)}}{\beta_{(12)}^6} \right) \left( 2e^{-\xi} - \frac{1}{2}e^{-2\xi} \right)^2. \quad (1)$$

Здесь  $\Phi_{0(12)}^{(2)}$ ,  $\Phi_{0(122)}^{(3)}$ ,  $\beta_{(12)}$  - параметры потенциалов парного и тройного взаимодействия частицы  $d B_{(1)}$  с частицами цилиндра из тела  $B_{(2)}$ .

Для контактного взаимодействия из (16) следует:

$$w(0) = \frac{3}{2} \left( \frac{\Phi_{0(12)}^{(2)}}{\beta_{(12)}^3} + \frac{3}{2} \frac{\Phi_{0(122)}^{(3)}}{\beta_{(12)}^6} \right). \quad (2)$$

При  $\Phi_{0(12)}^{(2)} > 0$ ,  $\Phi_{0(122)}^{(3)} < 0$  можно получить

$$w(0) = \left( \frac{3}{2} \right) \left( \frac{\Phi_{0(12)}^{(2)}}{\beta_{(12)}^3} - \frac{3}{2} \left| \frac{\Phi_{0(122)}^{(3)}}{\beta_{(12)}^6} \right| \right) \quad (3)$$

Если при этом выполняется неравенство

$$2 \left( \frac{\Phi_{0(12)}^{(2)}}{\beta_{(12)}^3} \right) < 3 \left| \frac{\Phi_{0(122)}^{(3)}}{\beta_{(12)}^6} \right|, \quad (4)$$

то окажется, что  $w(0) < 0$ . Адгезии нет.

Полученный вывод свидетельствует о том, что условие (4) может быть критерием для подбора такого ПАВ, которое может уменьшить вязкость жидкости, контактирующей с ним. Величина  $\Delta G$  изменения энергии активации по своему определению, пропорциональна величине  $w(0)$ . Поэтому условие  $w(0) < 0$  влечет за собой условие  $\Delta G < 0$  в формуле, определяющей коэффициент динамической вязкости.

В работе [18] приведен пример материала - талька, который обладает ожидаемым от ПАВ свойством – отсутствием адгезии. Он используется в качестве твердой смазки. Его специфической особенностью является отрицательное значение коэффициента Пуассона ( $\nu < 0$ ). В работе [19] показано, что таким же свойством обладает кристаллическая структура, образованная ориентированным в одном направлении набором органических молекул – цепей соединения  $C_{19}H_{40}$ . Такая цепь по структуре и длине совпадает с лиофобной частью известного ПАВ – лаурилсульфата натрия  $C_{12}H_{25}SO_4Na$ . При полном заполнении этим ПАВ металлической поверхности слоя этого ПАВ, а значит и его гидрофобной части, контактирующей с жидкой средой – водой будет совпадать со структурой соединения  $C_{24}H_{50}$ . Ввиду этого в качестве примерного материала использована эта структура.

По данным [19] для него известны следующие данные:  $G = 0,3 \cdot 10^3 \text{ Pa}$ ,  $E = 2,8 \cdot 10^9 \text{ Pa}$ ,  $\nu = -0,3$ . Для воды в расчетах использованы значения:  $G = 3 \text{ Pa}$ ,  $K = 2,2 \cdot 10^9 \text{ Pa}$ . В

результате расчетов оказалось, что  $w(0) < 0$ . Это означает, что гидрофобный материал С<sub>19</sub>H<sub>40</sub> в контакте с водой должен уменьшать вязкость ее поверхностного слоя из-за уменьшения энергии активации ее молекул.

Необходимо отметить, что полученный результат не означает полное обнуление вязкости и появление проскальзывания воды по стенке, так как модель, заложенная в основу получения вывода об уменьшении вязкости, не учитывала ее кинетической составляющей.

## 2. Моделирование движения абразивных частиц в сопле с ПАВ

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 (конструкционных) 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:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} &= P - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right], \\ \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} &= \frac{\gamma}{\nu_t} P - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma \omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_{\omega^2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $k$  – кинематическая энергия турбулентных пульсаций;

$\omega$  – удельная диссипация;

$\mu_t$  – турбулентная вязкость;

$P$  – генерирующий член;

$\sigma, \beta, \gamma$  – константы модели.

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.

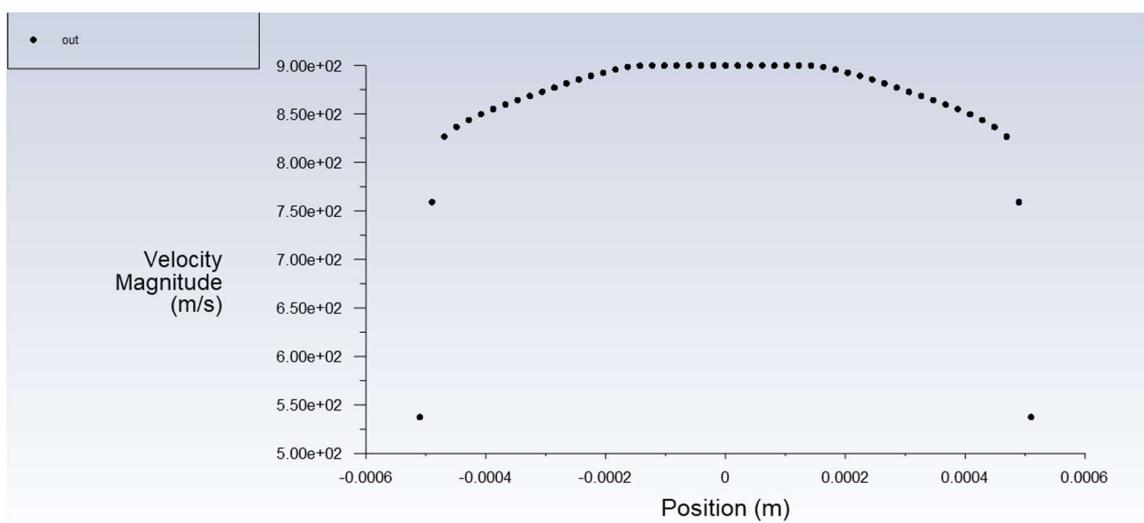


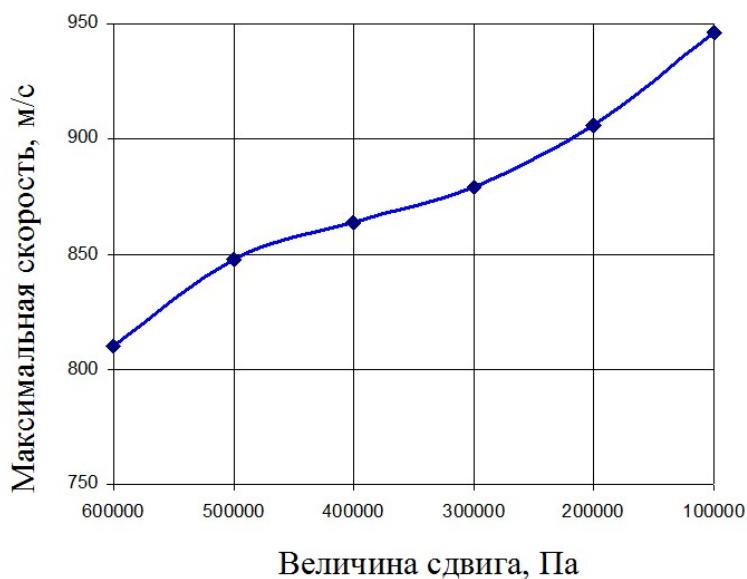
Рисунок 1 – Профиль скорости потока жидкости сопле при сдвиге на стенке канала  $1 \times 10^5$  Па

Следует отметить, что подходы пристенного моделирования EWT (Enhanced Wall Treatment для моделей  $k$ - $\epsilon$ ) и AWT (Automatic Wall Treatment для моделей  $k$ - $\omega$ ), реализованные в Fluent, обеспечивают автоматическое переключение между условиями прилипания и пристеночными функциями.

Это позволило по характерным экспериментальным или расчетным величинам проскальзывания воды по стенке канала сопла скорректировать изменение параметров скорости потока жидкости при введении ПАВ (рисунок 1).

Проведено моделирование проскальзывания рабочей среды на стенках канала фокусирующей трубы сопла. Установлено, что максимальная скорость потока достигает значения 946 м/с при наименьшем значении напряжения сдвига на стенках канала 100000 Па (рисунок 2). В свою очередь, на выходе из фокусирующей трубы скорость струи несколько снижается и составляет 899 м/с при расходе 0,88. Повышение напряжения сдвига на стенках канала в 2 раза до 200000 Па сопровождается снижением скорости потока жидкости на 5 – 6 % и на выходе из сопла уже составляет 891 м/с при расходе 0,85. Аналогичная зависимость наблюдается при дальнейшем увеличении напряжения сдвига на стенках канала до 500000 Па, что будет соответствовать движению жидкости без введения добавок ПАВ. В этом случае скорость струи на выходе из сопла снижается на 10 % и составляет 813 м/с при расходе 0,77.

Моделирование кинематических характеристик движения абразивных частиц в сопле гидроабразивного станка с добавкой ПАВ проводилось на базе Ansys AutoDyn. Численное моделирование проводилось без учета наличия камеры смешивания жидкости с абразивом в сопле гидроабразивного станка. Для упрощения расчетов форма абразива принята шарообразной. Моделирование кинематики движения в сопле проводилось в трехмерной постановке, в которой ось Z лежит вдоль оси симметрии сопла, а X, Y – в перпендикулярном направлении к Z. Скорость потока жидкости без ПАВ 800 м/с, с ПАВ – 950 м/с.



*Рисунок 2 – Скорость потока жидкости в фокусирующей трубке сопла при введении ПАВ*

По результатам моделирования установлено, что вдоль осевой линии сопла вода и абразивные частицы имеют максимум скорости на центральной линии сопла. Результаты показывают, что общее ускорение частиц для обоих случаев похожи. На участке вхождения абразива в трубку сопла скорости частиц равны и увеличиваются с по оси сопла Z. Однако скорость абразива в жидкости с добавкой ПАВ более быстро возрастает со 100 м/с до 700 м/с при прохождении расстояния 20 мм (рисунок 3). В потоке без ПАВ скорость абразива приближается к постоянной величине по всей длине фокусирующей трубы.

Абразив не может ускоряться так же быстро, как вода и он отстает от воды в процессе разгона. Только более мелкие частицы (100 мкм) приближаются к скорости воды на выходе из сопла. Более крупным частицам требуется больше времени для разгона. По мере увеличения длины сопла скорость частиц на выходе из сопла ближе к скорости воды. Увеличение скорости абразивной частицы повысить скорость гидроабразивного резания материалов. Однако большая длина сопла может привести к росту количества контактов абразива со стенками канала сопла, что приведет к большим потерям энергии и большему износу стенки сопла.

Действительно, абразив в потоке жидкости совершает множественные колебания по всей длине трубы сопла, что связано с турбулизацией потока жидкости и интенсивной пульсацией поперечной составляющей скорости [20]. Характерный пример представлен на рисунке 4. На графике можно выделить 3 стадии пульсации поперечной составляющей скорости гидроабразивного потока на расстоянии 5, 10, 30 мм.

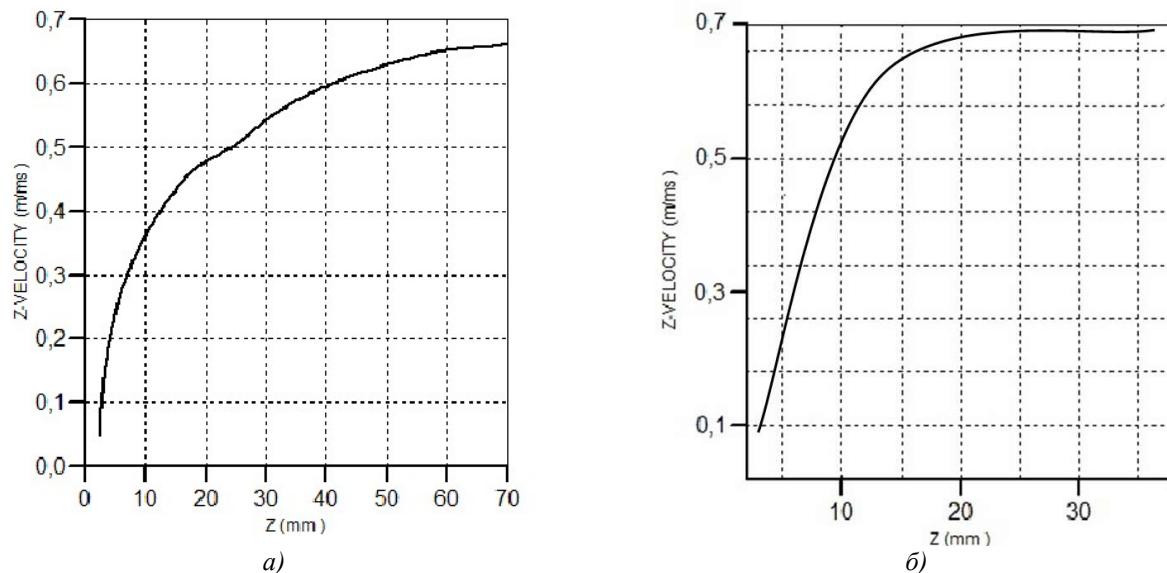


Рисунок 3 – Осевая скорость абразивной частицы в канале сопла:  
а) чистая вода, б) с ПАВ

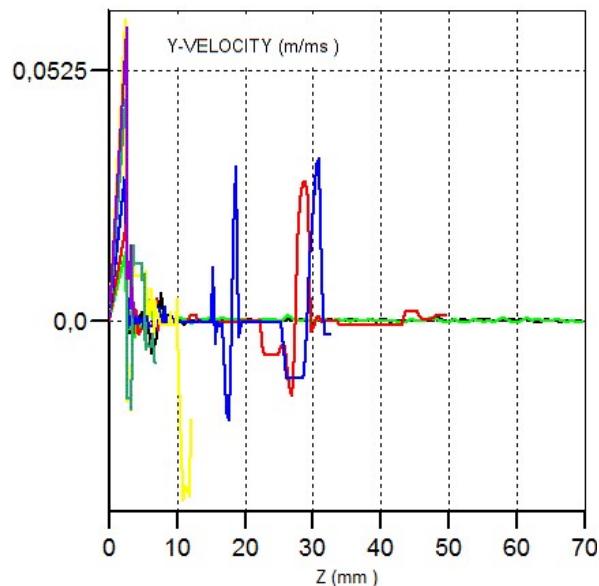


Рисунок 4 – Проекция поперечной скорости абразивной скорости на ось Z

На рисунке 5 представлены графики в канале сопла по осям X, Y. Необходимо отметить, что абразивные частицы совершают колебательные движения в поперечном направлении по собственным законам и чистота колебаний у каждого абразива своя.

Отмечается, что траектория движения одиночного абразива частицы зависит как от диаметра частицы, так и от начального расположения частиц на входе в сопло. Частицы большего диаметра отклоняются от линии тока и больше воздействуют на стенку канала сопла. Очевидно, что размер частицы оказывает большое влияние на траекторию частиц. Маленькие частицы (менее 100 мкм) увлекаются потоком жидкости и не ударяются о стенку сопла, в то время как более крупные частицы с начальным положением на больших радиальных расстояний будут иметь более высокую вероятность столкновения со стенкой сопла. Имея информацию о траектории частиц, можно определить место столкновения и компоненты скорости абразивной частицы. Это позволяет провести количественную оценку эрозии в месте удара. Можно предположить, что углы атаки абразива на стенки канала трубы сопла будут лежать в диапазоне от 2 до 16 град., а число ударов будет находиться в пределах 10000 уд/с.

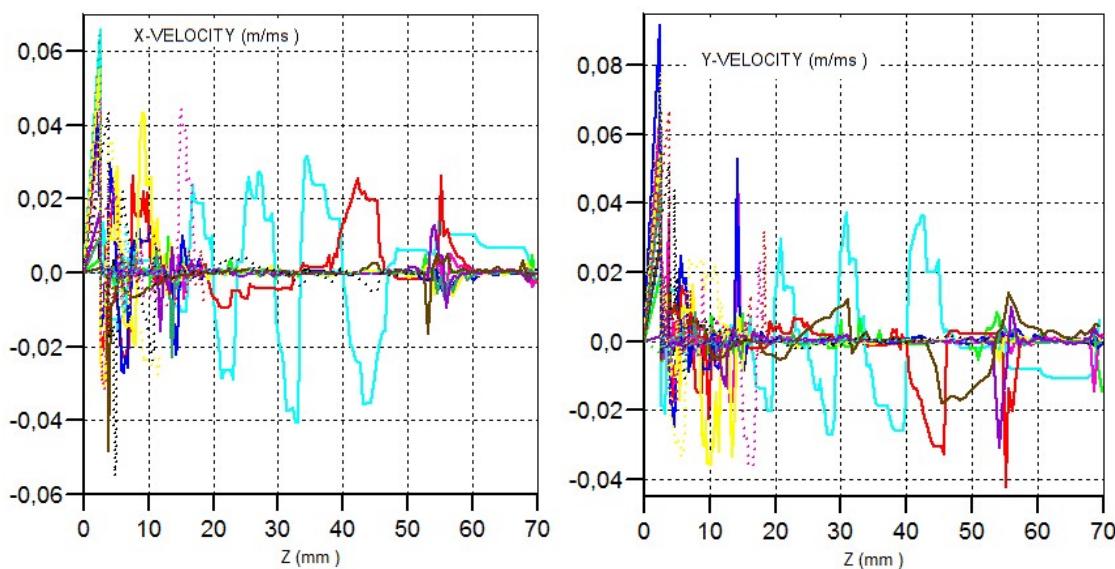


Рисунок 5 – Скорость абразивных частиц по осям X и Y

### Заключение.

Представленная в данной работе модель (1) – (4) позволяет сделать качественный вывод о влиянии ПАВ, нанесенного на металлическую поверхность, на значение вязкости поверхностно слоя контактирующего с ним потока жидкости. Полученный результат не означает полное обнуление вязкости и появление проскальзывания воды по стенке, так как модель, заложенная в основу получения вывода об уменьшении вязкости, не учитывала ее кинетическую составляющую. Проведенное моделирование движения гидроабразивного потока, модифицированного ПАВ в канале сопла, позволяет сделать оценку кинематических характеристик движения абразивных частиц (скорость, направление) с учетом профиля распределения абразивных частиц, влияния концентрации молекул ПАВ, снижающих вязкость на стенке канала сопла.

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

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Amar S., Onkar S. Water Jet Cutting Machines Market Research, 2030 // Engineering, Equipment and Machinery, 2022. – 214 р.
2. 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.
3. Momber, A.W. Energy transfer during the mixing of air and solid particles into a high-speed waterjet: An impact-force study. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2001, 25, 31–41.
4. Yang M, Wang Y, Kang C, Feng YU. Multiphase flow and wear in the cutting head of ultra-high pressure abrasive water jet. *Chinese Journal of Mechanical Engineering.* 2009;22:729-734
5. Барзов А.А., Галиновский А.Л., Хафизов М.В., Колпаков В.И. Повышение производительности гидроабразивной резки материалов путем выбора рациональных режимов обработки методом акустической эмиссии // Известия вузов. Машиностроение. 2016. №1 (670).
6. Бурнашов М.А., Прежбилов А.Н., Василенко Ю.В. Моделирование процесса разрушения покрытия водоледяной струей при очистке деталей машин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2017. Т. 17, № 2. С. 67–73 DOI: 10.14529/engin170208.
7. В.В. Шпилев, М.К. Решетников, Н.Н. Береда Моделирование закручиваемой абразивной струи при гидроабразивном резании // Вестник СГТУ, 2011. №2. С. 163-167.
8. Sitek, L., Hlaváček, P., Foldyna, J., Jarchau, M., Foldyna, V. (2021). Pulsating Abrasive Water Jet Cutting Using a Standard Abrasive Injection Cutting Head – Preliminary Tests. In: Klíčová, D., Sitek, L., Hloch, S., Valentínič, J. (eds) Advances in Water Jetting. Water Jet 2019. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-53491-2\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-030-53491-2_20)
9. Pogrebnyak A.V., Pogrebnyak V.G. Peculiarities of the Hydro-jet Water-Polymer Processing of Food Products by Cutting. *World Journal of Food Science and Technology.* Vol. 1, No. 1, 2017, pp. 28-31. DOI: 10.11648/j.wjfst.20170101.15
10. Goldstein S. Fluid Mechanics in the First Half of this Century // Annual Review of Fluid Mechanics. 1969.- Vol.1.- P.1-28, Richardson S. On the no-slip boundary condition // J. Fluid Mech.- 1973.- Vol.59.- No.4.- Pp.707-719.
11. Шлихтинг Г Теория пограничного слоя., перев. с немецкого, Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», Москва, 1974.
12. Rothstein J.P. Slip on Superhydrophobic Surfaces // Annu. Rev. Fluid Mech.- 2010.- Vol.42.- Pp.89-109.

13. Зорин З. М., Соболев В. Д., Чураев Н. В. Измерение капиллярного давления и вязкости жидкостей в кварцевых микрокапиллярах // ДАН СССР. 1970. Т. 193, № 4. С. 630– 633.
14. Дерягин Б.В., Железный Б.В., Зорин З.М. и др. Свойства 135 жидкостей в тонких кварцевых капиллярах. // В кн.: Поверхностные силы в тонких пленках и устойчивость коллоидов. М.: Наука, 1974, с.90-94.
15. Чураев Н.В. Поверхностные силы и физико химия поверхностных явлений // Успехи химии. 2004. 73 (1) С. 26 – 38.
16. Крокстон К. Физика жидкого состояния. Статистическое введение. М. Мир. 1978. 400 с.
17. Шоркин В.С. Об одной модели движения жидкости вблизи твердой поверхности // ПМТФ. 1981. № 3. С. 70 – 74.
18. Romashin, S.N., Shorkin, V.S. Variant of the Relationship between the Mechanical and Adhesive Properties of Solid Materials. // Mech. Solids 55, 1392–1405 (2020). <https://doi.org/10.3103/S0025654420080233>.
19. Maksym S. Stetsenko Determining the elastic constants of hydrocarbons of heavy oil products using molecular dynamics simulation approach // Journal of Petroleum Science and Engineering. 126(2015)124–130.
20. Герасимова А.М., Галиновский А.Л., Колпаков В.И. Анализ взаимодействия гидроабразивной струи с внутренней поверхностью канала фокусирующего сопла // Известия вузов. Машиностроение. 2015. №9.

**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](mailto:okozhus@mail.ru)

**Галиновский Андрей Леонидович**

МГТУ им. Н.Э. Баумана, доктор технических наук, профессор Заведующий кафедрой СМ-12 Москва, Госпитальный пер, д.10 [galcomputer@mail.ru](mailto:galcomputer@mail.ru)

**Тинякова Елизавета Алексеевна**

РХТУ им. Д.И. Менделеева 125047, г. Москва, Миусская площадь. д. 9. стр.1 Факультет БПЭ Направление подготовки – - биотехнология, 3 курс E-mail: [grtea2017@yandex.ru](mailto:grtea2017@yandex.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](mailto:awj@list.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](mailto:awj@list.ru)

**Преснечева Виктория Юрьевна**

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, Кандидат технических наук доцент кафедры информационных систем и цифровых технологий г. Орёл Наугорское шоссе, д. 29 [alluvian@mail.ru](mailto:alluvian@mail.ru)

O.G. KOZHUS, G.V. BARSUKOV, A.L. GALINOVSKY,  
T.A. ZHURAVLEVA, E.A.TINYAKOVA, V.YU PRESNETSOVA.

### MODELING OF THE KINEMATIC CHARACTERISTICS OF THE MOVEMENT OF ABRASIVE PARTICLES IN THE NOZZLE OF A WATERJET MACHINE WITH SURFACTANTS

**Abstract.** The article proposes a model of the interaction of a surfactant layer with a liquid, which allows us to draw a qualitative conclusion about the effect of surfactants on the viscosity of the surface layer of the liquid flow in contact with it. The results of modeling the movement of abrasive particles in a modified surfactant liquid flow in the nozzle channel are presented, which makes it possible to predict the effect of the concentration of surfactant molecules on nozzle wear and waterjet cutting performance.

**Keywords:** surfactants, cutting, abrasive, modeling.

### BIBLIOGRAPHY

1. Amar S., Onkar S. Water Jet Cutting Machines Market Research, 2030 // Engineering, Equipment and Machinery, 2022. – 214 p.
2. Barsukov G.V., Stepanov Yu.S., Kozhus O.G., Zhuravleva T.A. Optimization of parameters of components of equipment for waterjet cutting, ensuring an increase in processing efficiency // Fundamental and applied problems of engineering and technology. 2020. No. 3 (341). pp. 50-58.
3. Mamber, A.W. Energy transfer during the mixing of air and solid particles into a high-speed waterjet: An impact-force study. Exp. Therm. Fluid Sci. 2001, 25, 31–41.
4. Yang M, Wang Y, Kang C, Feng YU. Multiphase flow and wear in the cutting head of ultra-high pressure abrasive water jet. Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2009;22:729-734

5. Barzov A.A., Galinovsky A.L., Hafizov M.V., Kolpakov V.I. Improving the productivity of waterjet cutting of materials by choosing rational processing modes by acoustic emission method // Izvestiya vuzov. Mechanical engineering. 2016. №1 (670).
6. Burnashov M.A., Prezhbilov A.N., Vasilenko Yu.V. Modeling of the process of destruction of a coating by an ice jet during cleaning of machine parts // Bulletin of SUSU. The series "Mechanical Engineering". 2017. Vol. 17, No. 2. pp. 67-73 DOI: 10.14529/engin170208.
7. V.V. Shpilev, M.K. Reshetnikov, N.N. Bereda Modeling of a swirling abrasive jet during waterjet cutting // Bulletin of SSTU, 2011. No.2. pp. 163-167.
8. Sitek, L., Hlaváček, P., Foldyna, J., Jarchau, M., Foldyna, V. (2021). Pulsating Abrasive Water Jet Cutting Using a Standard Abrasive Injection Cutting Head – Preliminary Tests. In: Klíčová, D., Sitek, L., Hloch, S., Valentíček, J. (eds) Advances in Water Jetting. Water Jet 2019. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-53491-2\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-030-53491-2_20)
9. Pogrebnjak A.V., Pogrebnjak V.G. Peculiarities of the Hydro-jet Water-Polymer Processing of Food Products by Cutting. World Journal of Food Science and Technology. Vol. 1, No. 1, 2017, pp. 28-31. DOI: 10.11648/j.wjfst.20170101.15
10. Goldstein S. Fluid Mechanics in the First Half of this Century // Annual Review of Fluid Mechanics. 1969.- Vol.1.- P.1-28, Richardson S. On the no-slip boundary condition // J. Fluid Mech.- 1973.- Vol.59.- No.4.- Pp.707-719.
11. Schlichting G Theory of the boundary layer., transl. from the German, The Main editorial office of the physics and Mathematics literature of the publishing house "Nauka", Moscow, 1974.
12. Rothstein J.P. Slip on Superhydrophobic Surfaces // Annu. Rev. Fluid Mech.- 2010.- Vol.42.- Pp.89-109.
13. Zorin Z. M., Sobolev V. D., Churaev N. V. Measurement of capillary pressure and viscosity of liquids in quartz microcapillaries // DAN USSR. 1970. Vol. 193, No. 4. pp. 630–633.
14. Deryagin B.V., Zhelezny B.V., Zorin Z.M. et al. Properties of 135 liquids in thin quartz capillaries. // In the book: Surface forces in thin films and stability of colloids. M.: Nauka, 1974, pp.90-94.
15. Churaev N.V. Surface forces and physico-chemistry of surface phenomena // Successes of chemistry. 2004. 73 (1) pp. 26-38.
16. Croxton K. Physics of the liquid state. Statistical introduction. M. Mir. 1978. 400 p.
17. Shorkin V.S. On a model of fluid motion near a solid surface // PMTF. 1981. No. 3. pp. 70-74.
18. Romashin, S.N., Shorkin, V.S. Variant of the Relationship between the Mechanical and Adhesive Properties of Solid Materials. // Mech. Solids 55, 1392–1405 (2020). <https://doi.org/10.3103/S0025654420080233>.
19. Maksym S. Stetsenko Determining the elastic constants of hydrocarbons of heavy oil products using molecular dynamics simulation approach // Journal of Petroleum Science and Engineering. 126(2015)124–130.
20. Gerasimova A.M., Galinovsky A.L., Kolpakov V.I. Analysis of the interaction of a waterjet jet with the inner surface of the focusing nozzle channel // News of universities. Mechanical engineering. 2015. №9.

**Kozhus Olga Gennadievna**

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

**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

**Galinovsky Andrey Leonidovich**

Bauman Moscow State Technical University,  
Doctor of Technical Sciences, Professor  
Head of the SM-12 Department  
Moscow, Hospital lane, 10  
galcomputer@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

**Tinyakova Elizaveta Alekseevna**

D.I. Mendeleev Russian Technical Technical  
University of chemical technology  
9 Miusskaya Square, Moscow, 125047, p. 1  
Faculty of BPE The direction of training –  
- biotechnology, 3rd year  
E-mail: grtea2017@yandex.ru

**Presnetsova Victoria Yurievna**

Oryol State University  
named after I.S. Turgenev,  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of  
the Department of Information Systems and Digital  
Technologies,  
Orel, Naugorskoe highway, 29  
alluvian@mail.ru

С.А. ТИПАЛИН, Н.А. КУПРИЯНОВА, Н.Д. БОРИСОВ

## ИСКРИВЛЕНИЕ ЛИСТОВОГО МАТЕРИАЛА ПРИ РЕЗКЕ НАКЛОННЫМ НОЖОМ

**Аннотация.** В заготовительном производстве для снижения силы резания в штампах и на гильотинных ножницах используют наклонный инструмент. Проведено исследование по влиянию угла наклона на деформацию отрезаемой заготовки. Приведены зависимости искривления получаемого материала от толщины листа. Представлены графики, показывающие, что кривизна зависит и от модуля упругости материала. Более мягкий материал искривляется значительнее, чем материал с большим модулем упругости.

**Ключевые слова:** резка в штампе, наклонный нож, искривление заготовки, гильотинные ножницы, листовой металл.

### Введение

В заготовительном производстве резку листового материала осуществляют ножницами с прямыми или наклонными ножами, дисковыми ножницами или в штампе. Резка в штампе применяется для относительно коротких заготовок. При осуществлении операций разделения листового металла в штампах и ножницах с прямыми режущими кромками требуется значительная сила резания. Наличие наклона режущей кромки ножа уменьшает силу, что приводит к меньшему износу штампа и возможность применять оборудование с меньшей мощностью [1 – 3]. Однако использование резки с наклонным ножом приводит к искажению формы получаемой заготовки [4 – 6]. Если заготовка имеет небольшую ширину, то деформация происходит практически по окружности, а если ширина заготовки значительна, то деформация имеет винтообразный характер. Искривление заготовки может влиять на качество получаемого изделия или заставляет производителей вводить дополнительную операцию правки [7 – 9]. Работа посвящена экспериментальному выявлению закономерностей искривления материала при резке листов в штампах наклонным ножом.

### Основная часть

Зависимость искривления получаемых заготовок от толщины листа и угла наклона режущей кромки было выполнено экспериментально. На изготовленной оснастке предусмотрены сменные пuhanсоны, которыми проводилась отрезка материала. Углы наклона режущей кромки режущих пuhanсонов составляли 0, 2, 4 и 6 градусов.

На рисунке 1 представлена конструкция экспериментальной штамповой оснастки. Заготовку листового материала устанавливали на нижний нож и подавали на определенную величину под кронштейн 8, удерживающий заготовку в процессе резки от поворота под воздействием режущего ножа 4. В ходе эксперимента длину отрезаемой части 18 регулировали с помощью линейки. Для первоначальной отрезки ее величина составляла 5 мм. При движении траверсы пресса верхняя часть штампа с движется вниз и совмещается с нижней частью с помощью направляющих элементов (колонки 10 и втулки 11). Поскольку для проведения экспериментов требуется быстрая переналадка штампа на другой инструмент с другими углами наклона режущей кромки, предусмотрена фиксация в пuhanсонодержателе 6 верхнего ножа 4 установочным болтом 12. Движение пuhanсона 4 вдоль противоотжима 5 обеспечивает стабильность зазора между режущими инструментами, в результате чего уменьшаются отклонения разрезаемого материала от оси инструмента при возникновении горизонтальных сил при отрезке.

Использование угла наклона более 6 градусов нецелесообразно, так как интенсивное снижение силы происходит при небольших углах. Эксперимент проводили на листовой стали 08пс для трех различных толщин: 1, 1,5 и 2 мм. Ширина отрезаемой части составляла 80 мм. Листовой материал продвигался в зону штампа на величину от 5 мм.

По отрезанным заготовкам проводили замеры координат прогиба по длине отрезаемой части. Координаты искривленной заготовки фиксировали и по ним в графической компьютерной программе строили точки, которые соединялись в единую кривую и аппроксимировались окружностью. Радиус данной окружности фиксировали и на основании данных замеров и графической аппроксимации устанавливали зависимость искривления отрезаемой заготовки от угла наклона режущего инструмента.

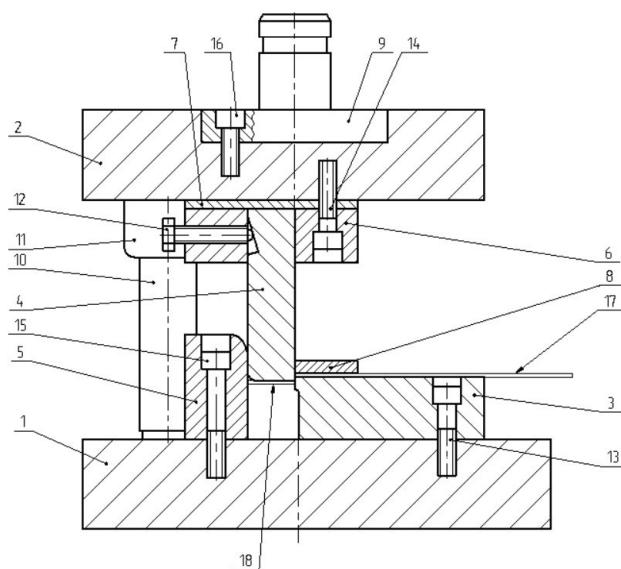


Рисунок 1 – Схема лабораторного штампа для отрезки:

1 – плита нижняя; 2 – плита верхняя; 3 – нож нижний; 4 – нож верхний (сменный); 5 – противоотжим; 6 – пuhanсонодержатель; 7 – плитка подкладная; 8 – кронштейн направляющий; 9 – хвостовик; 10 – колонка направляющая; 11 – втулка направляющая; 12 – болт установочный; 13 – винт крепления нижнего ножа; 14 – винт крепления пuhanсонодержателя; 15 – винт крепления противоотжима; 16 – винт крепления хвостовика; 17 – листовая заготовка; 18 – часть заготовки после отрезки)



Рисунок 2 – Штамповая оснастка со сменными ножами для отрезки заготовки

Если отрезать заготовку шириной более 5 мм, то по мере удаления от ножа кривизна снижается и листовой материал не изгибается, а закручивается. Данное явление происходит потому, что пластическому изгибу подвергается в основном часть, близкая к режущей кромке, а уже на некотором удалении от линии реза материал деформируется упруго и после окончания воздействия инструмента пытается восстановить форму, опосредованно воздействуя на пластически деформируемый участок, частично выпрямляя его. Так на расстоянии от 70 до 100 мм от линии реза, в зависимости от толщины заготовки, кривизна изгиба практически исчезает.



Рисунок 3 – Полученные заготовки

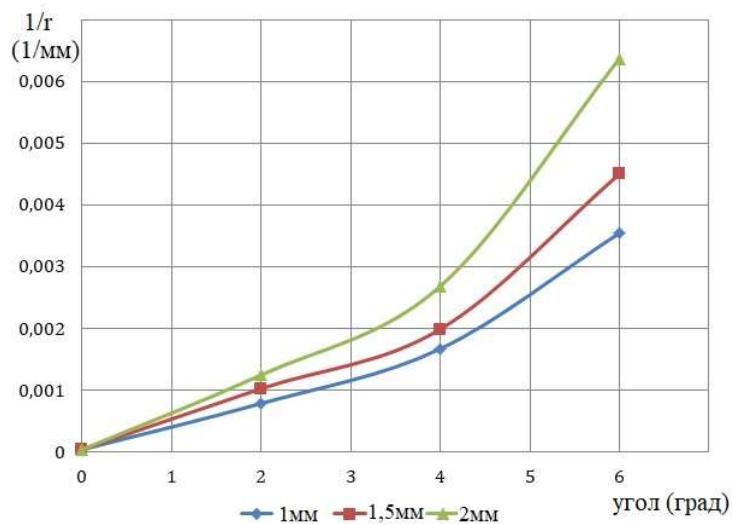


Рисунок 4 – Кривизна отрезаемой заготовки в зависимости от угла наклона ножа и толщины заготовки

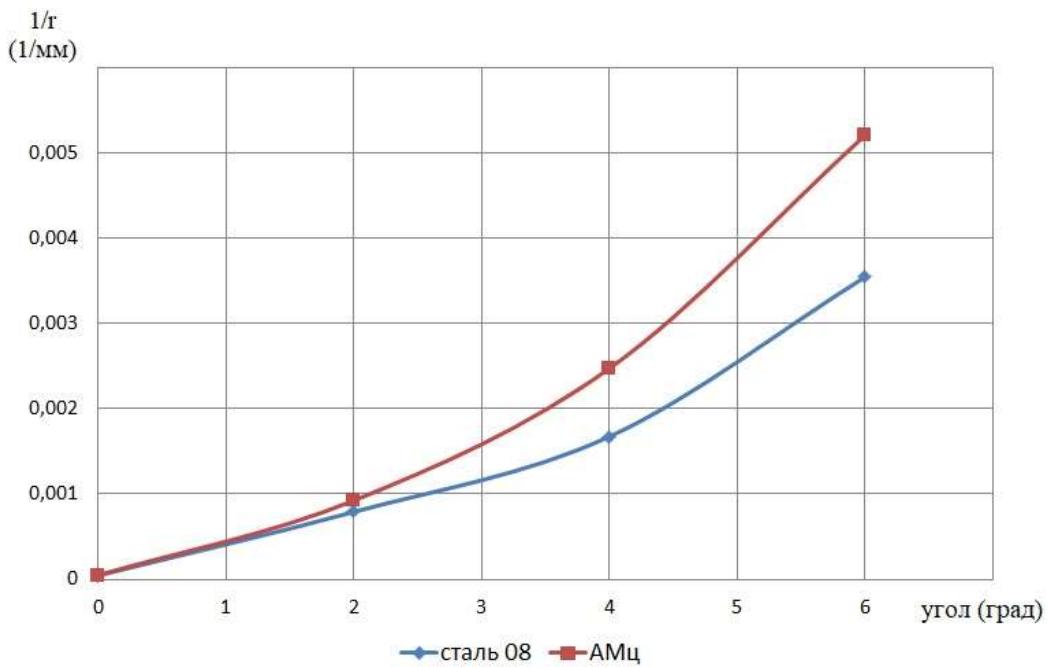


Рисунок 5 – Зависимость изменения кривизны отрезаемой стальной и алюминиевой заготовки от угла наклона режущего ножа

Отрезка заготовки прямым ножом создает максимальную силу резания, но не деформирует заготовку. Увеличение угла наклона приводит к уменьшению радиуса кривизны отрезаемой части. При этом зависимость увеличения радиуса изгиба заготовки при отрезке не является линейной. Увеличение толщины заготовки сказывается на увеличении деформации отрезаемой части. Максимальное искривление возникает при отрезке заготовки толщиной 2 мм при угле отрезаемого пuhanсона 6 градусов. Минимальный радиус искривления заготовки толщиной 2 мм при отрезке ножом с наклоном 6 градусов составил около 160 мм. Если же брать отрезаемую часть величиной больше в 4 раза (не 5мм, а 20 мм), то получаемый радиус увеличивается практически в два раза и составляет 302 мм. Это дает основание считать, что искривление заготовки зависит от жесткости отрезаемой детали.

Для подтверждение данного утверждения было проведено сравнение отрезаемой стальной детали (сталь 08) толщиной 1 мм и алюминиевого сплава АМц той же толщины.

Результаты экспериментов представлены на рисунке 5.

Как видно из представленного графика, алюминиевый сплав АМц при одних и тех же условиях резания больше деформируется, чем стальной лист. Данное явление можно объяснить тем, что модуль упругости алюминиевого сплава АМц составляет  $E = 0,71 \cdot 10^5$  МПа а модуль упругости стали 08 соответственно  $E = 2,03 \cdot 10^5$  МПа.

### Заключение

Анализ результатов эксперимента по отрезке листовых заготовок сменными пuhanсонами с наклонными ножами показал, что изменение радиуса искривления заготовки зависит не только от угла наклона режущего инструмента, но и толщины отрезаемой заготовки. С увеличением угла наклона режущей части пuhanсона, увеличивается кривизна заготовки. Для заготовки из материала с большим модулем упругости и свободным допуском на плоскостность можно рекомендовать угол наклона 2 – 3 градуса. Увеличение угла больше 4 градусов приводит к резкому уменьшению радиуса искривления, и заготовка должна подвергаться операции правки или исправление формы детали может осуществляться в штампах на последующих операциях. Для более толстого материала следует снижать угол наклона инструмента, так как с увеличением толщины увеличивается искривление детали. Рекомендации по снижению угла наклона необходимо для более мягкого материала. Если же после отрезки деталь подвергается правке, то ограничения по наклону инструмента несущественны. Так как на величину искажения заготовки влияет и ширина отрезаемой части, то для каждой конкретной детали нужно выбирать угол наклона режущей кромки инструмента в зависимости от допустимых отклонений плоскостности материала, которые определяются условиями эксплуатации штампируемой детали.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке / В.П. Романовский – 6-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979. – 520 с.
2. Звороно Б.П. Расчет и конструирование штампов для холодной штамповки. Ч. 1. Вырезные и пробивные штампы / Б.П. Звороно. – Москва: изд-во и 1-я тип. Машгиза, 1949 (Ленинград). – 196 с.
3. Аверкиев Ю.А. Технология холодной штамповки / Ю.А. Аверкиев. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
4. Бурдуковский В.Г. Технология листовой штамповки: учебное пособие / В.Г. Бурдуковский. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. – 224 с.
5. Совершенствование процессов изготовления полуфабрикатов и заготовок из металлопроката на основе моделирования / Лисунец Н.Л. // Вестник МГТУ «Станкин». – 2020. – № 3 (54). С. 52 – 56.
6. Bohdal L., Kukielska L. Application of variational and FEM methods to the modeling and numerical analysis of guillotining process for geometrical and physical nonlinearity // Mechanika. 2014. Vol. 20 (2). Pp. 197 – 204.
7. Borovik P.V., Seleznyav M.E. Influence of a chevron type knife design on the quality of sheet material shearing // Metallurgical and Mining Industry. 2015. No. 5, Pp.218 – 223.
8. Орлов В.Г., Куприянова Н.А. Правка двухслойного листа // Сборник тезисов докладов XLIX Международной молодежной научной конференции: [Электронное издание]. 2023. С. 46 – 47. URL: <https://gagarin.mai.ru/> Дата публикации: 03.06.2023.
9. Правка сжатием листовых биметаллических заготовок малой кривизны / С.А. Типалин, Н.А. Куприянова //Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2023. – № 4 (360). С. 202 – 228.
10. Особенности расчета силовых параметров правки биметаллических листовых заготовок / С.А. Типалин, Ю.Г. Калпин, Н.А. Куприянова // Черные металлы. – 2023. – № 11 (1103). С. 42 – 46.

**Типалин Сергей Александрович**  
ФГАОУ ВО «Московский  
политехнический университет», г.  
Москва  
Канд. техн. наук, профессор,  
профессор кафедры «Обработка  
материалов давлением и  
аддитивные технологии»  
115280, г. Москва, Автозаводская  
улица, 16  
E-mail: tsa\_mami@mail.ru

**Борисов Никита Денисович**  
ФГАОУ ВО «Московский  
политехнический университет», г.  
Москва  
Аспирант кафедры «Обработка  
материалов давлением и  
аддитивные технологии»  
115280, г. Москва,  
Автозаводская улица, 16  
E-mail: nicbor1998@gmail.com

**Куприянова Надежда Андреевна**  
ФГАОУ ВО «Московский  
политехнический университет», г.  
Москва  
Аспирант кафедры «Обработка  
материалов давлением и  
аддитивные технологии»  
115280, г. Москва, Автозаводская  
улица, 16  
E-mail: kupriyanovana@mail.ru

S.A. TIPALIN, N.A. KUPRIYANOVA, N.D. BORISOV

## CURVATION OF THE SHEET MATERIAL WHEN CUTTING WITH AN INCLINED KNIFE

**Abstract.** In blank production, an inclined tool is used to reduce the cutting force in dies and guillotine shears. A study was conducted on the influence of the angle of inclination on the deformation of the cut blank. The dependences of the curvature of the resulting material on the thickness of the sheet are given. Graphs are presented showing that the curvature also depends on the elastic modulus of the material. A softer material bends more significantly than a material with a higher elastic modulus.

**Keywords:** die cutting, inclined knife, curvature of the blank, guillotine shears, sheet metal.

## BIBLIOGRAPHY

1. Romanovskij V.P. Spravochnik po holodnoj shtampovke / V.P. Romanovskij – 6-e izd., pererab. i dop. – L.: Mashinostroenie. Leningr. otd-nie, 1979. – 520 s.
2. Zvorono B.P. Raschet i konstruirovaniye shtampov dlya holodnoj shtampovki. CH. 1. Vyreznye i probivnye shtampy / B.P. Zvorono. – Moskva: izd-vo i 1-ya tip. Mashgiza, 1949 (Leningrad). – 196 s.
3. Averkiev YU.A. Tekhnologiya holodnoj shtampovki / YU.A. Averkiev. – M.: Mashinostroenie, 1989. – 304 s.
4. Burdukovskij V.G. Tekhnologiya listovoj shtampovki: uchebnoe posobie / V.G. Burdukovskij. – Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2019. – 224 s.
5. Sovremenstvovaniye processov izgotovleniya polufabrikatov i zagotovok iz metalloprokata na osnove modelirovaniya / Lisunec N.L. // Vestnik MGTU «Stankin». – 2020. – № 3 (54). S. 52 – 56.
6. Bohdal.L., Kukielka L. Application of variational and FEM methods to the modeling and numerical analysis of guillotining process for geometrical and physical nonlinearity // Mechanika. 2014. Vol. 20 (2). Pp. 197 – 204.
7. Borovik P.V., Seleznyav M.E. Influence of a chevron type knife design on the quality of sheet material shearing / Metallurgical and Mining Industry. 2015. No. 5, Pp.218 – 223.
8. Orlov V.G., Kupriyanova N.A. Pravka dvuhslojnogo lista // Sbornik tezisov dokladov XLIX Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchnoj konferencii: [Elektronnoe izdanie]. 2023. S. 46 – 47. URL: <https://gagarin.mai.ru/> Data publikacii: 03.06.2023.
9. Pravka szhatiem listovyh bimetallicheskikh zagotovok maloj krivizny / S.A. Tipalin, N.A. Kupriyanova //Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2023. – № 4 (360). S. 202 – 228.
10. Osobennosti rascheta silovyh parametrov pravki bimetallicheskikh listovyh zagotovok / S.A. Tipalin, YU.G. Kalpin, N.A. Kupriyanova // Chernye metally. – 2023. – № 11 (1103). S. 42 – 46.

**Tipalin Sergey Aleksandrovich**  
Moscow Polytechnic University  
Candidate of Engineering  
Sciences, full professor, professor  
at the Department «Materials  
Processing by Pressure and  
Additive Technologies»  
115280, Moscow,  
Avtozavodskaya street, 16  
E-mail: tsa\_mami@mail.ru

**Borisov Nikita Denisovich**  
Moscow Polytechnic University  
Postgraduate at the Department  
«Materials Processing by  
Pressure and Additive  
Technologies»  
115280, Moscow,  
Avtozavodskaya street, 16  
E-mail:  
nicbor1998@gmail.com

**Kupriyanova Nadezhda Andreevna**  
Moscow Polytechnic University  
Postgraduate at the Department «Materials  
Processing by Pressure and Additive  
Technologies»  
115280, Moscow, Avtozavodskaya street, 16  
E-mail: kupriyanovana@mail.ru

Г.В. БАРСУКОВ, А.А. ЧЕРЕПЕНЬКО

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГИДРОАБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ ЯЧЕИСТОЙ СОТОВОЙ СТРУКТУРЫ

**Аннотация.** В статье приведены результаты моделирования поведения материала ячеистой сотовой структуры при нагрузке со стороны абразивных частиц гидроабразивной струи жидкости, что позволяет вводить корректировку режимов обработки с учетом амортизирующих и энергопоглощающих свойств таких материалов.

**Ключевые слова:** гидроабразивное резание, абразив, сотовый материал, моделирование, численная модель

### Введение

С развитием науки и техники появляются новые материалы. Как правило, они имеют уникальные прочностные и конструкционные свойства, что создает проблемы их обработки традиционными способами [1, 2]. Это характерно и для получения деталей из листового материала ячеистой сотовой, применяемого в авиа- и ракетостроении в конструкциях летательных аппаратов. Такие материалы обладают низкой технологичностью при механических способах формообразования, а сложность контура деталей делает их применение в ряде случаев невозможным [3, 4].

Технология гидроабразивной резки, в отличие от традиционных технологий резки, обладает возможностью обрабатывать материалы ячеистой сотовой структуры любой формы без термического воздействия благодаря использованию энергии воды и простоты автоматического управления при помощи компьютера. Поэтому технология гидроабразивной резки стала основным методом для обработки подобных деталей из листа [6].

Промышленное применение этой технологии показала возможность резки практически всех известных материалов. Однако для гидроабразивной резки материалов ячеистой сотовой структуры режимы обработки не определены, что связано с различием в разрушении гидроабразивной струей сплошного материала и сотовой конструкции. При резке таких материалов по сложному контуру наблюдается искажение оси струи по траектории движения сопла, так как точка входа не совпадает с точкой выхода. Поэтому возникает необходимость в корректировке скорости струи при обходе контура детали из материалов ячеистой сотовой структуры.

Для решения этой проблемы авторами статьи [7] разработана математическая модель разрушения многослойной преграды с газовым зазором под действием сверхзвукового струйного потока свободных абразивных частиц. Полученные результаты позволили прогнозировать отклонение гидроабразивной струи в зависимости от давления истечения сверхзвукового потока, толщины преграды, природы самого материала, формы частиц, количества слоев, зазора между слоями, расхода абразива.

Другими особенностями материалов ячеистой сотовой структуры является низкая удельная плотность, низкая жесткость, склонность к деформации при сжатии и нагружении [8], что оказывает существенное влияние на процесс гидроабразивного резания таких материалов.

Поэтому исследования направленные на прогнозирование поведения материалов ячеистой сотовой структуры при нагрузке со стороны абразивных частиц струи жидкости являются актуальными и направлены на расчет режимов обработки с учетом амортизирующих и энергопоглощающих свойств таких материалов.

В механике деформируемого твердого тела к настоящему времени разработано большое количество моделей, описывающих поведение ячеистых структур, фазовые переходы в них, критерии разрушения и фрагментации тел под действием интенсивной нагрузки, а также континуальные модели развития разрушений [9].

Часть этих моделей хорошо исследована и не ставится под сомнение, однако вычислить аналитическим образом вытекающие из них следствия можно лишь для малых воздействий и очень простых по форме тел. Исследование поведения реальных тел со сложной геометрией,

подвергающихся значительным внешним воздействиям, приводящим к конечным деформациям являются сложной задачей.

Другая часть моделей призвана описать наблюдаемые явления, такие как формирование сложного вида разрушений возле места сильного удара. Однако ответить на вопрос, действительно ли модель адекватно описывает данное явление невозможно, без проведения ряда аналитических исследований. К аналитическим задачам стоит отнести и определение зачастую многочисленных параметров той или иной модели, которые практически невозможно измерить напрямую.

### 1. Основная часть

В рамках численной методики расчета исследуем процесс взаимодействия абсолютно жесткой абразивной частицы с преградой замкнутой ячеистой сотовой структуры, материал которой считается несжимаемой упругопластической средой без упрочнения, подчиненной условию Треска. Основные предположения: скорость каждой материальной точки в данный момент времени направлена по нормали к поверхности тела в точке А контакта тела и преграды.

Преграда моделируется упругопластической средой без упрочнения. В процессе проникания область преграды, примыкающая к поверхности частицы, находится в пластическом состоянии. Частицы преграды, приходящие в соприкосновение с поверхностью расширяющейся части жесткого абразива, получают скорость, равную нормальной составляющей скорости проникания к поверхности абразива. Вследствие этого происходит смещение и сжатие материала преграды в направлении этой нормали. Смещение частиц материала преграды в этой плоскости считается основным. Поэтому полагаем, что частицы преграды, находящиеся в плоскостях, перпендикулярных направлению проникания, в своем движении остаются на этих плоскостях. При этом движение частиц материала происходит в условиях плоского деформирования с цилиндрической симметрией. Как показывают расчеты, на основном участке глубины проникания абразива градиент напряжения в направлении скорости проникания мал, что служит некоторым основанием для принятых допущений. При этом граничное условие на свободных поверхностях преграды нарушается. Однако, можно предположить, что влияние свободных поверхностей локализовано в тонком слое, примыкающем к этим поверхностям. В процессе внедрения, абразив взаимодействует с преградой только своей передней расширяющейся частью. Далее происходит отрыв материала преграды от поверхности. В случае проникания острого конуса с конечным углом раствора в рамках принятой здесь модели считаем, что частицы преграды движутся по поверхностям, нормальным к поверхности проникающего конуса. Очевидно, что эти поверхности конические. Для задачи проникания в результате принятых допущений задача определения сил, действующих на абразив, сводится к исследованию процесса расширения круговой цилиндрической полости, начиная с нулевого радиуса, в упругопластической среде без упрочнения. Пластическая область вокруг полости ограничена цилиндрической поверхностью радиусом  $c$ , являющимся функцией времени. Область преграды вне этой поверхности находится в упругом состоянии.

Основные уравнения такой среды для случая одномерного движения - это уравнения неразрывности и уравнения движения частиц преграды в переменных Лагранжа:

$$\frac{1}{\phi+1} \frac{\partial}{\partial r} (r+u)^{\phi+1} = \frac{\rho_0}{\rho} r^\phi, \quad (1)$$
$$\rho_0 r^\phi \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (r+u)^\phi \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + (\sigma_r + \sigma_\theta) \frac{\partial}{\partial r} (r+u)^\phi,$$

где  $r$  - начальное расстояние частицы от центра симметрии;

$t$  - время;

$\rho_0, \rho$  - начальная и текущая массовая плотность частиц металла, учитывая условие несжимаемости среды  $\rho_0 = \rho$ ;

$\phi = 0, 1, 2$  - соответственно для сферического, цилиндрического и плоского случая движения.

Смещение лицевой поверхности преграды  $U(t)$  за промежуток времени  $\Delta t = t - t_0$  можно записать как:

$$U(t) = v_0(t_0)(t - t_0) + \frac{1}{2}(t - t_0)^2 \frac{dv_0}{dt} . \quad (2)$$

Задача определения давления и деформации преграды в окрестности точки А в данном случае сводится к исследованию процесса расширения сферической абразивной частицы. Предполагается, что положение пластической границы  $r = c(t)$  и тыльной поверхности преграды  $r = h(t)$  получено в результате расширения сферической абразивной частицы с внутренним радиусом  $R_0$  и внешним  $h_0$ , под действием равномерно распределенного внутреннего давления. Давление на свободной поверхности полагаем равным нулю. Уравнения движения и сохранения массы для несжимаемой среды в случае сферической симметрии примут вид:

$$\frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial r} (r + u)^3 = r^2, \quad (3)$$

$$\rho r^2 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (r + u)^2 \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + (\sigma_r + \sigma_\varphi) \frac{\partial}{\partial r} (r + u)^2, \quad (4)$$

Через  $\rho$  обозначена плотность материала преграды,  $\sigma_r$  и  $\sigma_\varphi$  - радиальное и окружное напряжения. В упругой области решение задачи возьмем в квазистатическом приближении:

$$\sigma_r = -\frac{4\tau c^3}{3h_0^3} \left( \frac{h_0^3}{r^3} - 1 \right), \quad (5)$$

$$u = \frac{4\tau c^3}{3Eh_0^3} \left( (1 - 2\nu)r + \frac{(1 + \nu)h_0^3}{2r^2} \right), \quad (6)$$

где  $E$  - модуль Юнга;

$\nu$  - коэффициент Пуассона материала преграды.

Интегрируя уравнение (2) с учетом граничных условий, получаем:

$$u = \sqrt[3]{r^3 + (R + U(t))^3 - R_0^3} - r. \quad (7)$$

Путем дифференцирования выражения (7) по времени определяются скорость и ускорение движения частиц среды:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{(R + U(t))^2 \dot{U}(t)}{\left( \sqrt[3]{r^3 + (R + U(t))^3 - R_0^3} \right)^2},$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\frac{2(R + U(t))^4 \dot{U}(t)^2}{\left( \sqrt[3]{r^3 + (R + U(t))^3 - R_0^3} \right)^5} + \frac{2(R + U(t))\dot{U}(t)^2 + (R + U(t))^2 \ddot{U}(t)^2}{\left( \sqrt[3]{r^3 + (R + U(t))^3 - R_0^3} \right)^2},$$

где  $\dot{U} = \frac{dU}{dt}$ ,  $\ddot{U} = \frac{d^2U}{dt^2}$ .

Условия текучести Треска записываются в виде:

$$\sigma_\varphi - \sigma_r = 2\tau.$$

Обращение правой части выражений (1), (5) в ноль, означает, что в точках поверхности сферы происходит отрыв среды от ее поверхности.

Для определения силы сопротивления, действующей на проникающую сферу, имеем:

$$F = 2\pi a_0^2 \int_0^{\theta_0} P \cos \theta \sin \theta d\theta, \quad (8)$$

где  $\theta_0$  - угол при котором происходит отрыв среды материала от поверхности индентора.

Соответственно уравнение движения сферического абразива в материале можно записать в виде:

$$m \frac{d^2 c_*}{dt^2} = -2\pi a_0^2 \left( \int_0^{\theta^*} P \cos \theta \sin \theta d\theta + \int_{\theta^*}^{\theta} P \cos \theta \sin \theta d\theta \right). \quad (9)$$

С начальными условиями:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 c_*}{dt^2} &= 0 \\ \frac{dc_*}{dt} &= v_0 \\ c_* &= a_0 \end{aligned} \quad (10)$$

запишем уравнение в развернутой форме:

$$\begin{aligned} m \frac{d^2 c_*}{dt^2} &= -2\pi a_0^2 \left( \int_0^{\theta^*} \left[ 4\tau \ln \left( \frac{h}{R} \right) + \rho \left( \frac{R^4 v_0^2}{2} \left[ \frac{1}{h^4} - \frac{1}{R^4} \right] - \right. \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \left. - (2Rv_0^2 + R^2 a_0) \left[ \frac{1}{h} - \frac{1}{R} \right] \right] \right] \cos \theta \sin \theta d\theta + \right) \\ &\quad + \int_{\theta^*}^{\theta} \left( \frac{4\tau}{3} \ln \left( \frac{c^3 + R^3 - R_0^3}{R^3} \right) + \rho \left( \frac{R^4 v_0^2}{2 \left( \sqrt[3]{c^3 + R^3 - R_0^3} \right)^4} - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \frac{(2Rv_0^2 + R^2 a_0)}{\sqrt[3]{c^3 + R^3 - R_0^3}} - \frac{1}{R} \right) \right] \cos \theta \sin \theta d\theta \end{aligned} \quad (11)$$

Учитывая, что уравнение (11) не имеет аналитического решения было решено разработать численную модель процессов деформации и разрушения ячеистых сотовых материалов для решения следующих задач: глубины проникания абразива, распределения напряжений и деформаций на поверхности абразива для различных кинематических условий воздействия.

## 2 Программная реализация модели

Программная реализация состоит из четырёх модулей:

- 1) SehMatrices - вспомогательный модуль с реализацией матричных вычислений;
- 2) SehModels - реализация вычислительной модели;
- 3) SehViews - функции визуализации;
- 4) SehCmds - команды взаимодействия с пользователем.

### 2.1 Модуль SehMatrices

Интерфейс модуля:

DEFINITION SehMatrices;

PROCEDURE CalcEigen (n: INTEGER; IN m: ARRAY OF ARRAY OF REAL; OUT nOfEigens: INTEGER; OUT vals: ARRAY OF REAL; OUT leftVects, lvInv: ARRAY OF ARRAY OF REAL);

PROCEDURE Inv (n: INTEGER; IN m: ARRAY OF ARRAY OF REAL; OUT ok: BOOLEAN; OUT inv: ARRAY OF ARRAY OF REAL);

PROCEDURE Mult (IN a, b: ARRAY OF ARRAY OF REAL; OUT res: ARRAY OF ARRAY OF REAL);

END SehMatrices.

CalcEigen - процедура вычисления собственных значений и собственных векторов матрицы.

Inv - процедура нахождения обратной матрицы.

Mult - процедура вычисления произведения матриц.

## 2.2 Модуль SehModels

Интерфейс модуля:

```
DEFINITION SehModels;
  IMPORT Models, Stores;
  TYPE
```

```
    Node = RECORD
      x1, x2, v1, v2, s11, s12, s22, s33: REAL
    END;
```

```
    Wall = POINTER TO LIMITED RECORD (Models.Model(Stores.Store))
```

```
      (w: Wall) GetNode (i, j: INTEGER; OUT node: Node), NEW;
      (w: Wall) SetNode (i, j: INTEGER; IN node: Node), NEW;
      (w: Wall) Step (dt: REAL), NEW;
      (w: Wall) X1count (): INTEGER, NEW;
      (w: Wall) X2count (): INTEGER, NEW
```

```
    END;
```

```
  PROCEDURE NewWall (x1count, x2count: INTEGER; h1, h2, sol, M: REAL): Wall;
```

```
END SehModels.,
```

Здесь Node – данные в узле сетки, Wall – двумерная расчётная сетка, имеющая методы GetNode и SetNode для получения данных узла, Step для выполнения перерасчёта за временной шаг dt.

Процедура-фабрика NewWall создаёт расчётную сетку указанного размера, шага, плотности материала, также указывается масса индентора для выполнения расчётов.

Программная реализация требует решения следующих подзадач:

- введение структуры данных для хранения расчётной сетки и значений в её узлах (динамический двумерный массив структур узлов);

- реализация алгоритмов пошагового расчёта значений в узлах сетки (пересчёт координат узлов, пересчёт шести компонентов вектора и – скоростей и напряжений). В соответствии с формулами, приведёнными в предыдущем разделе, такой расчёт требует нахождения собственных значений матриц, что является отдельной подзадачей и требует реализации решения систем линейных уравнений.

## 2.3 Модуль SehView

Интерфейс модуля:

```
DEFINITION SehViews;
```

```
  IMPORT Views, SehModels;
```

```
  PROCEDURE New (w: SehModels.Wall; dt: REAL; scale: INTEGER; posX, posY: REAL): Views.View;
```

```
  PROCEDURE SetSteps (count: INTEGER);
```

```
END SehViews.
```

Процедура-фабрика New создаёт графический объект для указанной сеточной модели, с указанным масштабом и положением видимой области.

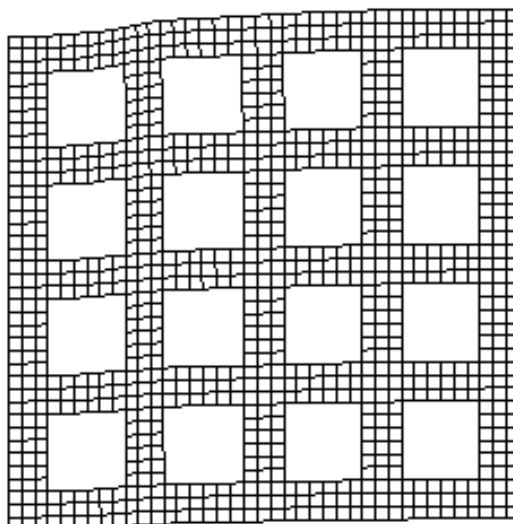
Процедура SetSteps позволяет настроить количество дискретных временных шагов, «прокручиваемых» при нажатии пользователем клавиши пробела.

Графические алгоритмы:

1 Рисование сетки. Рисуются горизонтальные ломаные и вертикальные ломаные, с учётом внутренних полостей и границ.

2 Отображение карты деформаций и напряжений. Вокруг каждого узла сетки закрашивается многоугольник, с вершинами в серединах исходящих сторон из узла и в центрах прилегающих четырёхугольников.

Результаты расчетов, сетки в тела и триангуляция в пространства между ними, полученные в ходе моделирования удара абразивного зерна по упругопластической преграде ячеистой сотовой структуры представлены на рисунке 1.



*Рисунок 1 - Распределение напряжений в упругопластической ячеистой сотовой преграде 4x4 от удара абразивной частицы (t = 0,2 с)*

### **Заключение.**

В статье представлены зависимости для решения ряда динамических задач гидроабразивного резания материалов ячеистой сотовой структуры: глубины проникания хрупкого абразива в неподвижную упругопластическую преграду замкнутой ячеистой сотовой структуры, распределения давления на поверхности проникающего тела для различных кинематических условий воздействия. Предложен метод численно-аналитического расчета деформирования замкнутой ячеистой сотовой структуры.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Барсуков Г.В., Степанов Ю.С., Кожус О.Г., Журавлева Т.А. Оптимизация параметров компонентов оборудования для гидроабразивной резки, обеспечивающая повышение эффективности обработки // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2020. № 3 (341). С. 50-58.
2. Базенов Г.М., Итыбаева Г.Т., Касенов А.Ж., Янюшкин А.С. гидроабразивная технология резки листового стекла // СТИН. 2022. № 8. С. 17-21.
3. Камалов Т.В. Рассмотрение решения проблемы изготовления деталей и элементов оборудования для ракетно-космической отрасли с использованием технологии аддитивного производства // В книге: XLVII Академические чтения по космонавтике 2023. Сборник тезисов, посвященный памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства. Москва, 2023. С. 414-415.
4. Ле В.Т. Деформирование слоистых композитных пластин при низкоскоростном контакте с жестким индентором // Инженерный журнал: наука и инновации. 2023. № 10 (142).
5. Нозирзода Ш.С. Разработка и исследование математической модели установки гидроабразивной резки // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2021. № 1 (69). С. 32-43.
6. Тарасов В.А., Галиновский А.Л. Проблемы и перспективы развития гидроструйных технологий ракетно-космического машиностроения // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 3 (15). С. 23.
7. Степанов Ю.С., Барсуков Г.В., Михеев А.В. Моделирование разрушения многослойной преграды с газовым зазором под действием сверхзвукового струйного потока свободных абразивных частиц // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2010. № 4-2 (282). С. 65-70.
8. Zhou, X., Zhou, H., Li, X., and Chen, C. (2015). Size Effects on Tensile and Compressive Strengths in Metallic Glass Nanowires. J. // Mech. Phys. Sol. 84, 130–144. doi:10.1016/j.jmps.2015.07.018).
9. Суфияров В.Ш., Орлов А.В., Борисов Е.В. и др. Моделирование механических свойств ячеистых структур, изготовленных селективным лазерным плавлением // Письма о материалах. 2020. Т.10. №2. С.123-128.

**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

**Черепененко Аркадий Анатольевич**

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

G.V. BARSUKOV, A.A. CHEREPENKO

## MODELING OF THE PROCESS OF WATERJET TREATMENT OF CELLULAR CELLULAR STRUCTURE MATERIALS

**Abstract.** The article presents the results of modeling the behavior of a cellular honeycomb structure material under load from abrasive particles of a waterjet jet of liquid, which makes it possible to adjust processing modes taking into account the shock-absorbing and energy-absorbing properties of such materials.

**Keywords:** waterjet cutting, abrasive, honeycomb material, modeling, numerical model.

### BIBLIOGRAPHY

1. Barsukov G.V., Stepanov Yu.S., Kozhus O.G., Zhuravleva T.A. Optimization of parameters of components of equipment for waterjet cutting, ensuring an increase in processing efficiency // Fundamental and applied problems of engineering and technology. 2020. No. 3 (341). pp. 50-58.
2. Bazenov G.M., Itybaeva G.T., Kasenov A.Zh., Yanushkin A.S. waterjet technology for cutting flat glass // STIN. 2022. No. 8. pp. 17-21.
3. Kamalov T.V. Consideration of the solution to the problem of manufacturing parts and equipment elements for the rocket and space industry using additive manufacturing technology // In the book: XLVII Academic Readings on Cosmonautics 2023. A collection of abstracts dedicated to the memory of academician S.P. Korolev and other outstanding Russian scientists — pioneers of space exploration. Moscow, 2023. pp. 414-415.
4. Le V.T. Deformation of layered composite plates in low-speed contact with a rigid indenter // Engineering Journal: Science and Innovation. 2023. № 10 (142).
5. Nozirzoda S.S. Development and research of a mathematical model of a waterjet cutting machine // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2021. No. 1 (69). pp. 32-43.
6. Tarasov V.A., Galinovsky A.L. Problems and prospects of development of hydrojet technologies of rocket and space engineering // Engineering Journal: Science and Innovation. 2013. No. 3 (15). p. 23.
7. Stepanov Yu.S., Barsukov G.V., Mikheev A.V. Modeling the destruction of a multilayer barrier with a gas gap under the action of a supersonic jet stream of free abrasive particles // Fundamental and applied problems of engineering and technology. 2010. No. 4-2 (282). pp. 65-70.
8. Zhou, X., Zhou, H., Li, X., and Chen, C. (2015). Size Effects on Tensile and Compressive Strengths in Metallic Glass Nanowires. J. // Mech. Phys. Sol. 84, 130–144. doi:10.1016/j.jmps.2015.07.018.
9. Sufiarov V.Sh., Orlov A.V., Borisov E.V. and others. Modeling of mechanical properties of cellular structures made by selective laser melting // Letters on Materials. 2020. vol.10. No.2. pp.123-128.

**Barsukov Gennady Valerievich**

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

**Cherepenko Arkady Anatolievich**

Oryol State University  
named after I.S. Turgenev,  
Doctor of Technical Sciences,  
Associate Professor of the Department of Mechanical  
Engineering  
Orel, Moskovskaya St., 34  
Tel: +79038806976  
arkan@nxt.ru

© Г.В. Барсуков, А.А. Черепенько, 2024

## **МАШИНОВЕДЕНИЕ И МЕХАТРОНИКА**

УДК 621.01/03

DOI: 10.33979/2073-7408-2024-365-3-52-61

В.Н. СЫЗРАНЦЕВ, К.В. СЫЗРАНЦЕВА, И.С. СЕРДЮК

### **РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ПО ПЛОЩАДКЕ КОНТАКТА НАГРУЗКИ В ЗАЦЕПЛЕНИИ ПРЯМЫХ И БОЧКООБРАЗНЫХ ЗУБЬЕВ В УСЛОВИЯХ ИХ ПЕРЕКОСА**

**Аннотация.** В статье на основе решения объемной краевой контактной задачи разработана методика расчета нагрузки, распределенной по площадке контакта в зацеплении прямых и бочкообразных зубьев, для случая их касания при наличии угла перекоса. Методика учитывает: фактическую функцию зазоров в окрестности точки контакта поверхностей зубьев и расположение этой точки на поверхности прямого или бочкообразного зуба при известном угле перекоса; конечные размеры и изгибио-сдвиговые деформации зубьев; краевые эффекты при «выходе» площадки контакта на один или оба торца зуба. Представлены результаты расчета распределения контактных напряжений по площадке контакта для прямозубой передачи и передачи с бочкообразными зубьями с различной величиной локализации контакта при вариации угла перекоса. Методика позволяет реализовать процедуру синтеза геометрии передач с бочкообразными зубьями в заданных условиях их эксплуатации.

**Ключевые слова:** цилиндрические передачи, прямые и бочкообразные зубья, перекос, контактные напряжения.

#### **Введение**

Общая тенденция машиностроения к уменьшению металлоемкости изделий и повышению их энергонасыщенности предъявляет к зубчатым передачам особые требования, связанные с их эксплуатацией при высоких нагрузках. В этих условиях деформации элементов передач и корпусных деталей увеличиваются, в результате возникают дополнительные погрешности положения зубчатых колес. Наиболее опасным среди погрешностей является угол перекоса. Величина эксплуатационных углов перекоса часто существенно превышает углы перекоса, связанные с технологиями изготовления и сборки. Наличие угла перекоса в зацеплении прямозубых передач приводит к кромочному контакту зубьев и концентрации контактных напряжений, снижающих долговечность передач [1,2,3,4]. В машиностроении широкое распространение получили цилиндрические прямозубые передачи с продольной модификацией зубьев. В этих передачах уменьшение максимальной величины нагрузки достигается за счет увеличения ее среднего значения. Эти передачи дают ощутимый выигрыш в долговечности при работе в условиях перекосов осей колес [5,6]. Для сопоставительной оценки нагруженности зацепления прямых и бочкообразных зубьев при наличии угла перекоса необходимо знать функцию распределения напряжений по площадке контакта. При расчете этой функции требуется учитывать изменение жесткости зацепления зубьев в различных фазах их контакта, переменную жесткость зубьев по длине вследствие их конструктивного исполнения, возможность распространения площадки контакта на всю или часть длины зуба, «выход» площадки контакта в условиях перекоса на один или оба торца зуба. В основе инженерных расчетов наиболее часто для решения задачи расчета нагруженности передач используется решение Герца, полученное в рамках теории упругости для случая контакта цилиндров неограниченной длины, с введением уточняющих коэффициентов концентрации нагрузки [1,6,7,8]. Упрощающие допущения классических решений контактной задачи не позволяют учесть конечные размеры и форму зуба, и, как следствие этого, на результатах расчетов сказываются неучтенные изгибио-сдвиговые деформации зубьев и повышенная податливость краев зуба. Для современных передач, удельная нагруженность которых постоянно увеличивается, такие модели теории упругости являются весьма упрощенными и реализовать процедуры синтеза геометрии передач с учетом особенностей зацепления зубьев при случайном характере как внешней нагрузки, так и углов перекоса, не позволяют. Для расчета прочности и моделирования условий контакта в настоящее время широко применяются компьютерные методы, основанные на использовании различных модификаций метода конечных элементов [9,10,11,12]. Эти методы дают надежные

результаты, но обычно требуют длительной подготовки и высоких вычислительных затрат [3]. Особенности решения задач методами конечных элементов передач с пространственным зацеплением зубьев связаны с тем, что заранее координаты точки геометрического контакта зубьев и параметры площадки контакта неизвестны, в результате граничные условия задачи определяются и корректируются в ходе итерационного процесса. Если решается задача оптимизации геометрии передачи по обеспечению требуемой контактной долговечности для заданных случайных величин крутящего момента и углов перекоса [13], то получить представительные выборки действующих контактных напряжений в различных точках поверхности зуба на основе использования программного обеспечения метода конечных элементов весьма проблематично.

В настоящей статье для расчета распределения напряжений по площадке контакта в зацеплении прямых и бочкообразных зубьев колес цилиндрических передач разработана математическая модель, основой которой является решение объемной контактной задачи с учетом собственных и контактных деформаций зубьев, краевых эффектов при «выходе» площадки контакта на один или оба торца зуба.

**Разработка математической модели расчета нагрузки, распределенной по площадке контакта в зацеплении прямых и бочкообразных зубьев при наличии их перекоса**

При решении задачи нагруженности зацепления прямых и бочкообразных зубьев необходимо иметь информацию о положении точки касания их поверхностей и функции зазоров между контактирующими зубьями в конечной окрестности этой точки. Функция зазоров, приведенная к направлению внедрения контактирующих поверхностей прямых и бочкообразных зубьев, описывается зависимостью:

$$Z(x, y) = B_2 y^2 + A_1 x + A_2 x^2 \quad (1)$$

где  $Z(x, y)$  – функция зазоров в окрестности точки касания поверхностей зубьев;

$x, y$  – координаты окрестности точки касания в продольном ( $x$ ) и профильном ( $y$ ) направлениях зуба;

$B_2$  – коэффициент функции зазора в профильном направлении;

$A_1, A_2$  – коэффициенты функции зазора в продольном направлении зуба.

Коэффициенты  $A_2$  и  $B_2$  определяются главными приведенными кривизнами в окрестности точки контакта в продольном (координата  $x$ ) и профильном (координата  $y$ ) направлениях.

Особенностью разработанного в настоящей работе метода расчета величины площадки контакта и закона распределения на ней контактной нагрузки заключается: в учете фактической функции зазоров в окрестности точки контакта и расположение этой точки на поверхности прямого или бочкообразного зуба при известном угле перекоса; конечные размеры и изгибино-сдвиговые деформации зубьев; краевые эффекты при «выходе» площадки контакта на один или оба торца зуба. Реализация метода решения данной задачи на ЭВМ позволяет для массивов случайных величин крутящего момента и угла перекоса получать данные о распределении нагрузки в контакте зубьев, необходимые для расчета вероятности безотказной работы передач в заданных условиях эксплуатации.

Для определения закона распределения нагрузки в контакте прямых и бочкообразных зубьев воспользуемся расчетной моделью для объемной контактной задачи в виде следующего интегрального уравнения [14, 15]:

$$\alpha_\varphi \iint_S P(x_p, y_p) \cdot G(x, x_p, y, y_p) dx_p dy_p = \omega(x, y) \quad (2)$$

где  $\alpha_\varphi$  – параметр, характеризующий податливость зацепления;

$S$  – площадь интегрирования;

$P(x_p, y_p)$  – функция, определяющая закон распределения нагрузки по площадке контакта;

$x_p, y_p$  – координаты точки приложения нагрузки;

$G(x, x_p, y, y_p) = 1 / \sqrt{(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2}$  – функция влияния (решение задачи Бусинеска);

$x, y$  – координаты точки контроля деформаций;

$\omega(x, y)$  – деформация поверхности контакта.

Если  $b(x_p)$  – ширина площадки контакта в сечении, определяемым координатой  $x_p$  (рисунок 1), а полудлина площадки контакта равна  $a$ , то интегральное уравнение (2) преобразуется к виду:

$$\alpha_\varphi \int_a^a dx_p \int_{-b(x_p)}^{b(x_p)} \frac{P(x_p, y_p) dy_p}{\sqrt{(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2}} = \omega(x, y) \quad (3)$$

В зацеплении прямых и бочкообразных зубьев площадка контакта сильно вытянута в продольном направлении, при этом отношение  $a/b > 6$ , что позволяет, используя теорему о среднем, удельную нагрузку  $g(x_p)$  описать следующим выражением:

$$g(x_p) \cdot 1 = \int_{-b(x_p)}^{b(x_p)} P(x_p, y_p) dy_p \quad (4)$$

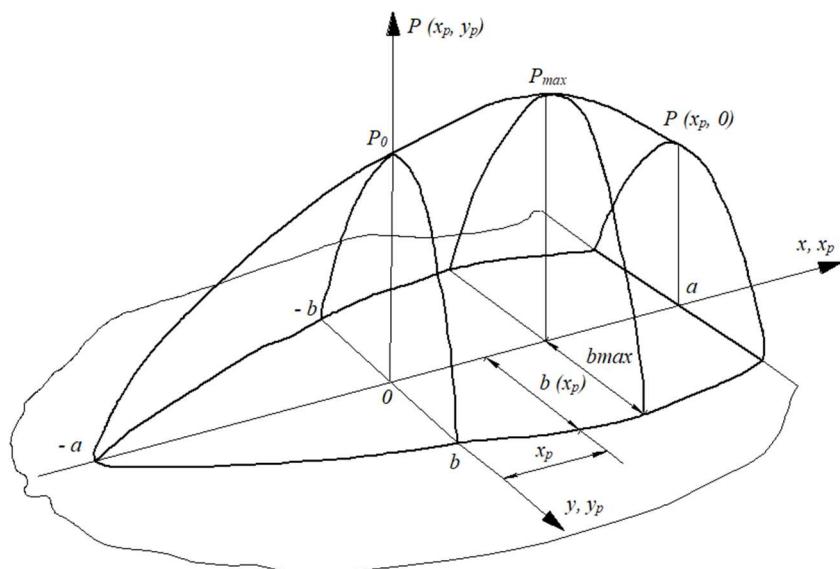


Рисунок 1 – К определению закону распределения нагрузки в зацеплении прямых и бочкообразных зубьев

Учитывая зависимость (4), интегральное уравнение (3) преобразуется к виду:

$$\alpha_\varphi \int_{-a}^a dx_p \int_{-b(x_p)}^{b(x_p)} \frac{P(x_p, y_p) dy_p}{\sqrt{(x - x_p)^2}} = \omega(x) \quad (5)$$

или

$$\alpha_\varphi \int_{-a}^a G(x, x_p) \cdot g(x_p) dx_p = \omega(x)$$

где  $G(x, x_p) = 1/|x - x_p|$ .

Для расширения возможностей использования модели (2) для решения задачи распределения нагрузки по площадке контакта в зацеплении зубьев цилиндрических колес, введем функцию  $\lambda(x_p)$ , учитывающую изменение собственных (в месте приложения нагрузки штампом) деформаций в случае нагружения тела ограниченных размеров, каким является зуб колеса. В результате функция  $G(x, x_p)$  примет вид:

$$G(x, x_p) = \frac{\lambda(x_p)}{|x - x_p|} \quad (6)$$

Функция деформаций  $\lambda(x_p)$  позволяет путем обработки данных экспериментальных или численных исследований деформированного состояния зубчатых колес учесть конструкцию зубчатых колес, толщину обода, асимметрию ступицы на распределение нагрузки по площадке контакта.

Уравнение (5) в своей постановке содержит ядро, которое приводит к интегралу, не существующему в смысле главного значения по Коши. Поэтому решение уравнения (5)

получено только для внутренней области интегрирования, граница области интегрирования исключена.

Воспользуемся рисунком 2, на котором показана эпюра распределения удельной нагрузки  $g(x_p)$ . Граница площадки контакта вдоль оси  $x$  определяется значениями  $x_1$  и  $x_2$ . В этом случае уравнение (5) преобразуется к виду:

$$\alpha_\varphi \int_{x_1}^{x_2} \lambda(x_p) \frac{g(x_p)}{|x - x_p|} dx_p = \omega(x) \quad (7)$$

Из граничных условий на краях площадки контакта в зацеплении зубьев следует:

$$\omega(x) = \Delta_0 - Z(x) \quad (8)$$

где  $\Delta_0$  – величина сближения зубьев;

$Z(x)$  – функция зазоров (1) между контактирующими зубьями в направлении оси  $x$ .

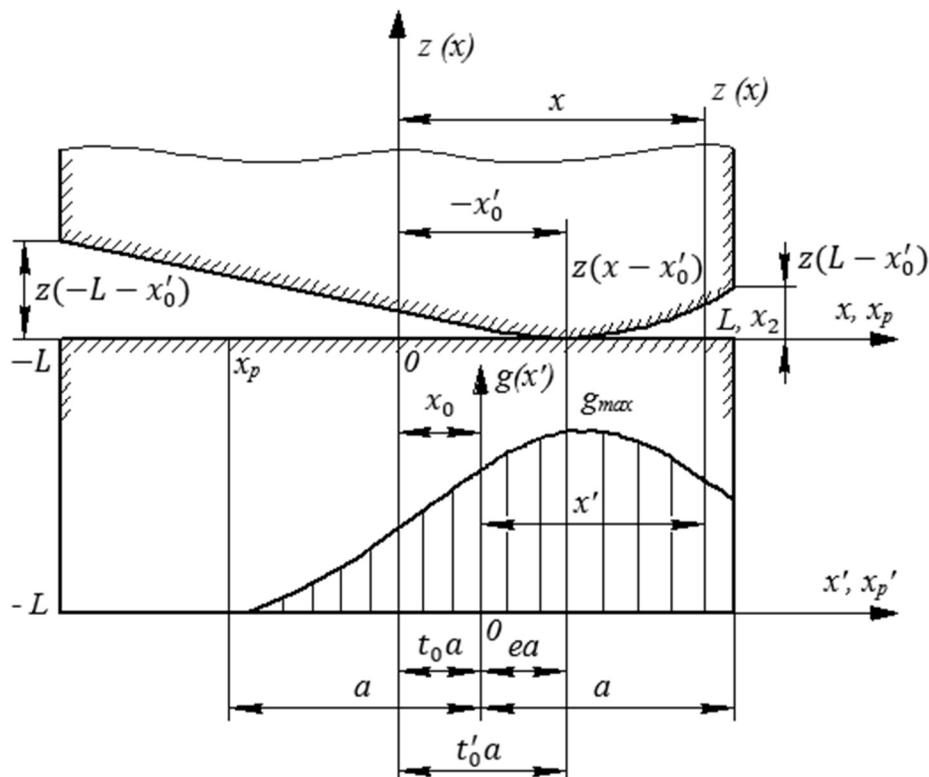


Рисунок 2 – Расчетная схема к задаче определения закона распределения нагрузки

При «выходе» площадки контакта на торец зуба необходимо граничные условия на величину его деформации  $\Delta_T$  скорректировать:

$$\omega(x) - \Delta_T = \Delta_0 - Z(x) \quad (9)$$

Объединяя (8) и (9), установим:

$$\omega(x) = \Delta - Z(x)$$

и

$$\Delta = \Delta_T + \Delta_0 \quad (10)$$

где  $\Delta_T$  – величина деформации.

После чего уравнение (7) примет вид:

$$\alpha_\varphi \int_{-x_1}^{x_1} \lambda(x_p) \frac{g(x_p)}{|x - x_p|} dx_p = \Delta - Z(x) \quad (11)$$

или

$$\alpha_\varphi \int_{-x_1}^{x_1} G(x, x_p) \cdot g(x_p) dx_p = \Delta - Z(x)$$

В результате задача о распределении нагрузки в зацеплении прямых и бочкообразных зубьев в их продольном направлении сведена к решению интегрального уравнения (11) относительно функции  $g(x_p)$ .

Параметр  $\alpha_\varphi$ , входящий в зависимости (11), для случая контакта зубьев в полюсе, рассчитывается по выражению:

$$\alpha_\varphi = \frac{(3,22 + G_1 + G_2)}{E_p} \quad (12)$$

где  $E_p$  – приведенный модуль упругости материала шестерни и колеса;

$G_1$  и  $G_2$  – коэффициенты, описываемые формулами:

$$G_1 = 0,85 \cdot \left( \frac{G_{\gamma 1}}{m_n} \right)^3 + \frac{35}{z_1} + \frac{187}{z_1^2} - 200 \cdot \frac{\chi_1}{z_1^2}; \quad (13)$$

$$G_2 = 0,85 \cdot \left( \frac{G_{\gamma 2}}{m_n} \right)^3 + \frac{35}{z_2} + \frac{187}{z_2^2} - 200 \cdot \frac{\chi_2}{z_2^2}; \quad (14)$$

$$G_{\gamma 1} = \sqrt{\left( \frac{1}{K_{11}} \right)^2 + (r_{b1})^2 - r_{f1}^2}; \quad (15)$$

$$G_{\gamma 2} = \sqrt{\left( \frac{1}{K_{21}} \right)^2 + (r_{b2})^2 - r_{f2}^2}; \quad (16)$$

где  $K_{11}, K_{21}$  – главные кривизны по длине зубьев шестерни и колеса (для прямых зубьев  $1/K_{11} = 0; 1/K_{21} = 0$ );

$r_{b1}, r_{b2}$  – радиусы основной окружности шестерни и колеса:

$$r_{b1} = \frac{z_1 m_n \cos \alpha_0}{2} \quad (17)$$

$$r_{b2} = \frac{z_2 m_n \cos \alpha_0}{2} \quad (18)$$

$r_{f1}, r_{f2}$  – радиусы окружностей впадин зубьев шестерни и колеса:

$$r_{f1} = \frac{z_1 m_n}{2} - (h_a + c_0 - \chi_1) \cdot m_n; \quad (19)$$

$$r_{f2} = \frac{z_2 m_n}{2} - (h_a + c_0 - \chi_2) \cdot m_n; \quad (20)$$

где  $c_0$  – коэффициент радиального зазора;

$h_a$  – коэффициент высоты головки зуба;

$m_n$  – нормальный модуль;

$z_1, z_2$  – числа зубьев шестерни и колеса;

$\chi_1, \chi_2$  – коэффициенты смещения инструмента при нарезании зубьев шестерни и колеса;

$\alpha_0$  – угол профиля исходного производящего контура.

В процессе решения объемной контактной задачи (11) определения закона  $g(x_p)$  распределения нагрузки в зацеплении прямых (бочкообразных) зубьев и полудлины площадки контакта ( $a$ ) при наличии угла перекоса зубьев ( $\gamma$ ), функция зазоров в окрестности контакта которых описывается зависимостью (1):

$$Z(x) = A_1 x + A_2 x^2 \quad (21)$$

необходимо рассматривать три возможных случаев расположения площадки контакта в продольном направлении поверхности зуба, ширина которого равна ( $b_w$ ), а полудлина  $L = b_w/2$ :  $a = L$ ;  $a < L$  и площадка контакта не «выходит» на край зуба;  $a < L$  и площадка контакта «выходит» на край зуба. При решении задачи расчета величины  $a$  для заданной суммарной нагрузки  $P_\Sigma$  в зацеплении зубьев, требуется обеспечить выполнение условия равновесия:

$$\int_{-a}^a g(x_p) dx_p = P_\Sigma \quad (22)$$

Уравнение (22) может решаться только на основе численных методов.

В результате решения задачи (11) для расчета удельной нагрузки при заданных геометрических параметрах цилиндрической передачи, угла перекоса и суммарной нагрузке, получено выражение:

$$g(u) = \frac{P_\Sigma \left[ \frac{\Delta_T}{2} + Q(u) \right]}{a \cdot \lambda(u) \cdot \left( \frac{E_0 \Delta_T}{2} + F_2 \right)} \quad (23)$$

использование которого правомерно при выполнении условия равновесия (22), преобразованного к виду:

$$|2aF_2 - P_\Sigma \alpha_\varphi| < \varepsilon \quad (24)$$

В формулах (23), (24) введены обозначения:

$u = x'/a$  – безразмерная координата текущей точки площадки контакта в направлении оси  $x'$  (рисунок 2), изменяющаяся в интервале  $-1 \leq u \leq 1$ ;

$x'$  – координата текущей точки  $-a \leq x' \leq a$ , в центре площадки контакта  $x' = 0$ ;

$\varepsilon$  – заданная точность решения задачи;

$$\Delta_T = 2 \left[ \frac{(P_\Sigma \cdot \alpha_\varphi)}{2a} - F_2 \right] / E_0; \quad (25)$$

$$Q(u) = [\alpha_1(1+u) + \alpha_2(1-u^2)]/2; \quad (26)$$

$$F_2 = [\alpha_1(E_0 + E_1) + \alpha_2(E_0 - E_2)]/2; \quad (27)$$

$$E_0 = \int_0^\pi \lambda(\tau) \sin t dt; \quad (28)$$

$$E_1 = \int_0^\pi \lambda(\tau) \sin t \cos t dt; \quad (29)$$

$$E_2 = \int_0^\pi \lambda(\tau) \sin t \cos 2t dt; \quad (30)$$

$$\lambda(\tau) = [1 - K_L(a/L)^4(t_0 - \cos t)^4]^{-1}; \quad (31)$$

$$\text{где } K_L = \begin{cases} 0 & \text{для } [4m_n - L(t_0 - \cos t)] \geq 0 \\ 0,5 & \text{для } [4m_n - L(t_0 - \cos t)] < 0 \end{cases}, \quad (32)$$

$$t_0 = (x'_0 + ea)/a$$

где  $x'_0$  – смещение точки контакта вдоль оси  $x'$ , для прямозубых колес ( $A_2 = 0$ ) при  $\gamma \neq 0$ ,  $x'_0 = L$ , для бочкообразных зубьев  $x'_0 = \tan \gamma / (2A_2)$ . Если  $x'_0 > L$ , то принять  $x'_0 = L$ ;

$e$  – безразмерный параметр, рассчитываемый для случая «выхода» площадки контакта на торец зуба, что соответствует условию  $x'_0 + a > L$ , по формуле:

$$e = (a + x'_0 - L)/a, \text{ иначе } e = 0; \quad (33)$$

$$\alpha_1 = 2 \cdot A_2 a^2 e; \quad (34)$$

$$\alpha_2 = A_2 a^2 / 2. \quad (35)$$

При фиксированном угле перекоса  $\gamma$  и величине нагрузки  $P_\Sigma$  алгоритм расчета  $g(u)$  для исследуемой цилиндрической передачи при контакте зубьев в полюсе заключается в минимизации с заданной точностью ( $\varepsilon$ ) функции (24) путем варьирования полудлины площадки контакта в диапазоне  $a_{min} \leq a \leq L$  с учетом трех, выше рассмотренных, возможных случаев расположения площадки контакта в продольном направлении поверхности зуба. Установленная в результате реализации описанной процедуры величина  $a$ , по формуле (23) обеспечивает возможность расчета величины удельной нагрузки в любой точке по длине площадки контакта.

Знание закона  $g(u)$  позволяет определить величину максимальной нагрузки  $P(u, 0)$  по длине площадки контакта, а также рассчитать ее ширину  $b(u)$  по следующим зависимостям [14, 15]:

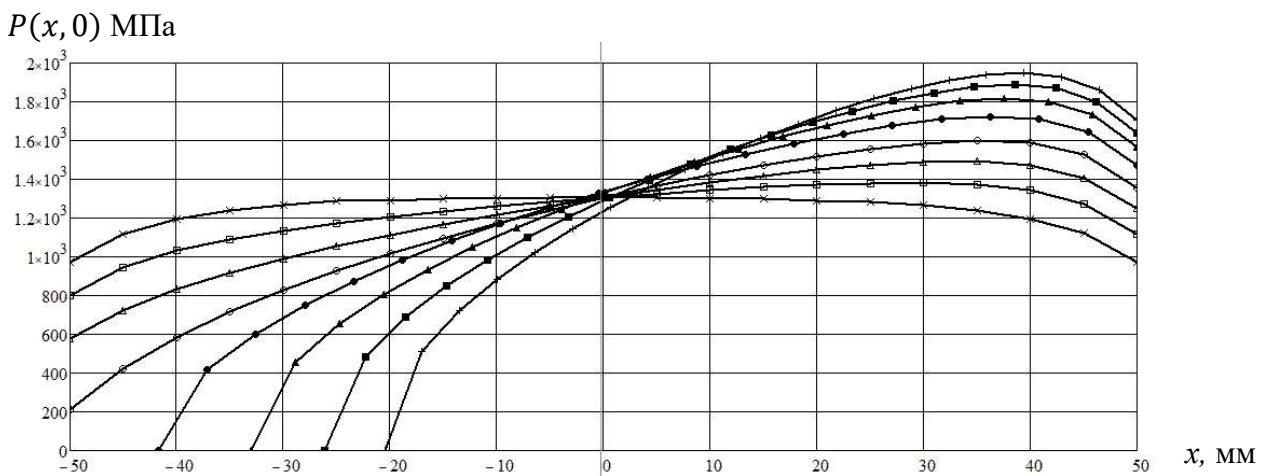
$$P(u, 0) = \sqrt{\frac{g(u) \cdot E_p}{[\pi \cdot (1 - \nu^2)]}}; \quad (36)$$

$$b(u) = 2 \cdot \sqrt{\frac{g(u) \cdot (1 - \nu^2)}{(\pi \cdot B_2 \cdot E_p)}} \quad (37)$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона материала шестерни и материала колеса.

**Результаты расчета нагрузки, распределенной по площадке контакта в зацеплении прямых и бочкообразных зубьев при наличии их перекоса**

Разработанная математическая модель расчета нагруженности площадки контакта в зацеплении прямых и бочкообразных зубьев цилиндрических передач реализована в программе для ЭВМ. С использованием этой программы исследуем распределение контактной нагрузки в зацеплении прямозубой передачи, имеющей параметры:  $z_1 = 12$ ;  $z_2 = 53$ ;  $m_n = 10,5\text{мм}$ ;  $\chi_1 = 0,429$ ;  $\chi_2 = -0,357$ ;  $\alpha_0 = 20^\circ$ ;  $c_0 = 0,25$ ;  $h_a = 1$ ;  $b_w = 100\text{мм}$ ;  $T_{1H} = 6000 \text{ Н}\cdot\text{м}$  – крутящий момент на шестерне;  $P_\Sigma = 1,015 \cdot 10^5 \text{ Н}$ ;  $E_p = 2,15 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ ;  $\nu = 0,3$ . Величина угла перекоса зубьев в зацеплении  $\gamma = 0', 1', \dots, 7'$ . Результаты выполненных расчетов представлены на рисунке 3.



**Рисунок 3 – Распределение нагрузки по длине площадки контакта в прямозубой передаче при различных углах перекоса зубьев:  $\gamma = 0'(\times), 1'(\square), 2'(\Delta), 3'(\circ), 4'(\bullet), 5'(\blacktriangle), 6'(\blacksquare), 7'(+)$**

Из анализа полученных данных следует, что по мере увеличения угла перекоса растет величина максимальных контактных напряжений (при  $\gamma = 7'$  коэффициент концентрации контактных напряжений  $K_{F\beta} = 1,493$ ). Площадка контакта распространяется на всю ширину зуба до значения  $\gamma = 3'$  ( $K_{F\beta} = 1,226$ ) после чего «отрывается» от левого торца зуба и концентрируется на правой его стороне. В результате, начиная с  $\gamma \approx 3,5'$ , площадка контакта становится меньше ширины зуба, несущая способность передачи, как и ее долговечность, с увеличением угла перекоса будут резко снижаться.

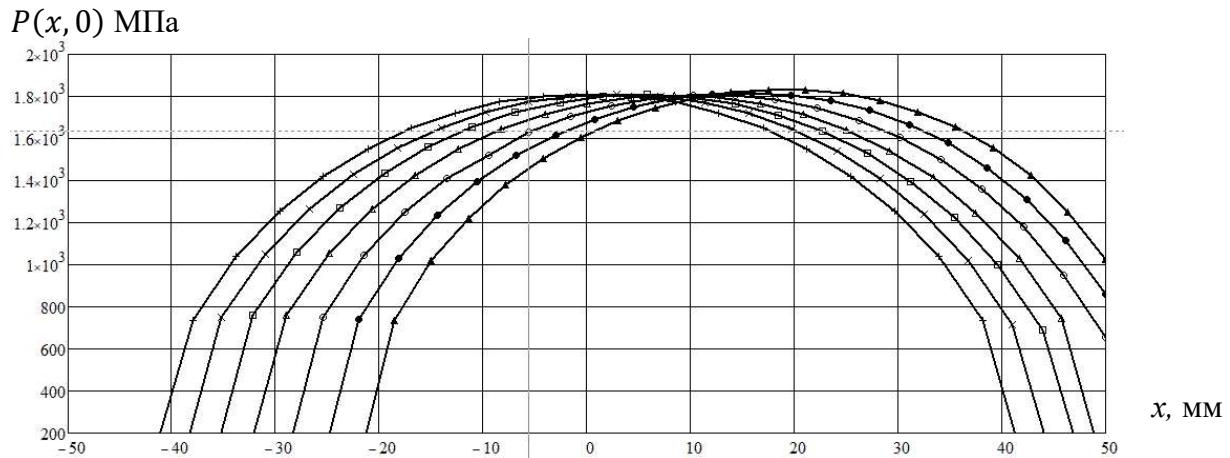
Размеры площадок контакта и распределение на них контактных напряжений в той же передаче при различных углах перекоса для случая бочкообразных зубьев отражены на рисунке 4 - величина «бочки»  $\Delta = 0,25 \text{ мм}$  и на рисунке 5, -  $\Delta = 0,125 \text{ мм}$ .

Полученные результаты свидетельствуют, что если в качестве допустимой принять величину максимальных контактных напряжений  $P(x, 0) = 1724 \text{ МПа}$ , возникающих в прямозубой передаче при  $\gamma = 4'$  ( $K_{F\beta} = 1,321$ ), то нагрузочная способность передачи с бочкообразными зубьями ( $\Delta = 0,25 \text{ мм}$ ) будет исчерпана в диапазоне углов перекоса от  $\gamma = 0'$  до  $\gamma = 12'$ , в котором  $P(x, 0) = 1812 \dots 1819 \text{ МПа}$ . Если же использовать передачу с бочкообразными зубьями с  $\Delta = 0,125 \text{ мм}$ , то максимальные контактные напряжения сравняются с допускаемой величиной лишь при  $\gamma = 7'$  ( $P(x, 0) = 1735 \text{ МПа}$ ). То есть данная передача с бочкообразными зубьями остается с позиций контактной прочности работоспособной при углах перекоса практически в два раза больших, нежели передача с прямыми зубьями.

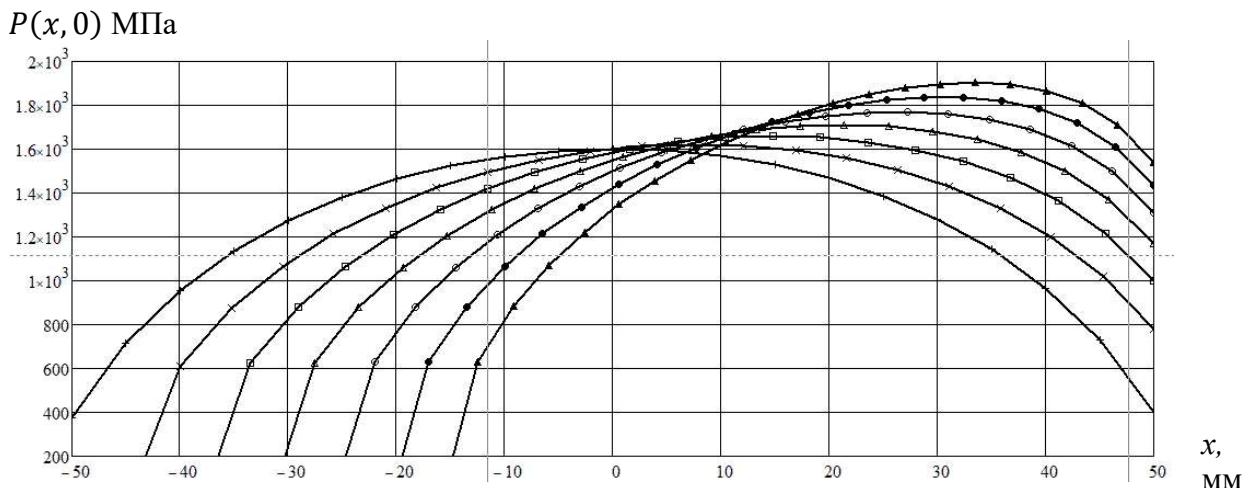
### Заключение

Для определения закона распределения по площадке контакта нагрузки в зацеплении прямых или бочкообразных зубьев при работе цилиндрической передачи в условиях ненулевого угла перекоса, на основе решения объемной краевой контактной задачи разработана методика, реализующая итерационную процедуру расчета. Методика учитывает: фактическую функцию зазоров в окрестности точки контакта поверхностей зубьев и расположение этой точки на поверхности прямого или бочкообразного зуба при известном

угле перекоса; конечные размеры и изгибо-сдвиговые деформации зубьев; краевые эффекты при «выходе» площадки контакта на один или оба торца зуба. Реализация методики на примерах расчета при различных величинах угла перекоса прямых и бочкообразных зубьев цилиндрической передачи позволяет оценить нагруженность зацепления зубьев, установить предельную величину угла перекоса исходя из возникающих контактных напряжений, определить рациональную величину бочкообразности зубьев для заданных углов перекоса.



**Рисунок 4 – Распределение нагрузки по длине площадки контакта в цилиндрической передаче с бочкообразными зубьями  $\Delta = 0,25$  мм при различных углах перекоса зубьев:**  
 $\gamma = 0' (+), 2' (x), 4' (\square), 6' (\Delta), 8' (\circ), 10' (\bullet), 12' (\blacktriangle)$



**Рисунок 5 – Распределение нагрузки по длине площадки контакта в цилиндрической передаче с бочкообразными зубьями  $\Delta = 0,125$  мм при различных углах перекоса зубьев**  
 $\gamma = 0' (+), 2' (x), 4' (\square), 6' (\Delta), 8' (\circ), 10' (\bullet), 12' (\blacktriangle)$

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нахатакян Ф. Г. Оценка величины допускаемого угла перекоса в зубчатом зацеплении / Ф. Г. Нахатакян, Д. Ф. Нахатакян. - Текст: непосредственный // Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2022. - № 1. - С. 45-49.
2. Sanchez M. Approximate equations for the meshing stiffness and the load sharing ratio of spur gears including hertzian effects / M. Sanchez, M. Pleguezuelos, J. Pedrero. - Direct text // Mechanism and Machine Theory. - 2017. - 109. - P. 231-249.
3. Pedrero J. Analytical Simulation of the Tooth Contact of Spur Gears / J. Pedrero, M. Pleguezuelos, M. Sanchez. - URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-34945-5\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-34945-5_4) (date of the application 26.01.2020). - Text: electronic.
4. Roda-Casanova V. An approach for solving the contact problem in spur gear transmissions considering gear misalignments / V. Roda-Casanova, F. Sanchez-Marin, J. L. Iserte. - Direct text // Proceedings of the ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE 2015). - 2015. Volume: ASME 2015 Power Transmission and Gearing Conference. - P. 1-10.

5. Короткин В. И. Прогнозирование контактной выносливости упрочненных зубьев и нагружочной способности эвольвентных зубчатых передач по критерию предельного состояния материала / В. И. Короткин, Е. М. Колосова, Н. П. Онишков. - DOI: 10.36652/0042-4633-2021-12-35-37. - Текст: электронный // Вестник машиностроения. - 2021. - № 12. - С. 31-35.
6. Нахатакян Ф. Г. Повышение нагружочной способности зубчатой передачи в условиях перекоса снижением контактных напряжений с помощью продольной модификации зубьев / Ф. Г. Нахатакян. - DOI: 10.36652/0042-4633-2021-12-13-16. - Текст: электронный // Вестник машиностроения. - 2021. - № 12. С. 13-16.
7. Дорофеев В. Л. Применение метода фиктивной нагрузки для решения проблемы расчета контактных напряжений / В. Л. Дорофеев. - Текст: непосредственный // Современное машиностроение. Наука и образование. - 2016. - № 5. - С. 390-401.
8. Короткин В. И. Контактная напряженность прямых зубьев эвольвентных зубчатых передач в условиях перекосов в зацеплении / В. И. Короткин, Д. А. Газзаев, Д. Ю. Сухов. - Текст: непосредственный // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. - 2011. - № 4. - С. 83-87.
9. Wen Q. Analytical calculation of the tooth surface contact stress of spur gear pairs with misalignment errors in multiple degrees of freedom / Q. Wen, Q. Du, X. Zhai. - Direct text // Mechanism and Machine Theory. - 2020. - 149. - 103823.
10. Zhou C. Modeling and calculation of impact friction caused by corner contact in gear transmission / C. Zhou, S. Chen. - Direct text // Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition). - 2014. - 27. - P. 958-964.
11. Tamarozzi T. Static modes switching in gear contact simulation / T. Tamarozzi, P. Ziegler, P. Eberhard, W. Desmet. - Direct text // Mechanism and Machine Theory. - 2013. - 63. - P. 89-106.
12. Li S. A tribo-dynamic contact fatigue model for spur gear pairs / S. Li, A. Anisetti. - Direct text // International Journal of Fatigue. - 2017. - 98. - P. 81-91.
13. Lebedev S. Yu. Probability estimate of the strength reliability of toothed wheel gear / S. Yu. Lebedev, V. N. Syzrantsev. - Direct text // Procedia Structural Integrity. - 2023. - 50. - P. 155-162.
14. Сызранцев В. Н. Цилиндрические передачи с арочными зубьями: геометрия, прочность, надежность: монография / В. Н. Сызранцев, К. В. Сызранцева. - Тюмень: ТИУ, 2020. - 171 с. - Текст: непосредственный.
15. Сызранцев В. Н. Методы синтеза геометрических параметров цилиндрических передач с локализованным контактом / В. Н. Сызранцев, В. П. Городничий. - Текст: непосредственный // Вестник машиностроения. - 1990. - №9. - С. 35-37.

**Сызранцев Владимир Николаевич**  
ФГБОУ ВО «Тюменский  
Индустриальный университет», г.  
Тюмень  
Доктор технических наук,  
профессор, заслуженный деятель  
науки РФ, профессор кафедры  
машин и оборудования нефтяной и  
газовой промышленности  
625000, г. Тюмень, ул. Володарского,  
38  
Телефон: 8-912-926-59-02  
E-mail: syzrantsevvn@tyuui.ru

**Сызранцева Ксения Владимировна**  
ФГБОУ ВО «Тюменский  
Индустриальный университет», г.  
Тюмень  
Доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры машин и  
оборудования нефтяной и газовой  
промышленности  
625000, г. Тюмень, ул. Володарского,  
38  
Телефон: 8-912-923-34-03  
E-mail: kv.sy whole="100%" data-bbox="450 650 910 665"/>

**Сердюк Иван Сергеевич**  
ФГБОУ «Тюменский  
Индустриальный  
университет», г. Тюмень  
Аспирант кафедры машин и  
оборудования нефтяной и  
газовой промышленности  
625000, г. Тюмень, ул.  
Володарского, 38  
Телефон: 8-950-485-65-69  
E-mail:  
serdyuk.ivan.98@mail.ru

V.N. SYZRANTSEV, K.V. SYZRANTSEVA, I.S. SERDYUK

## CALCULATION OF THE LOAD DISTRIBUTED OVER THE CONTACT AREA IN THE MESHING OF STRAIGHT AND BARREL-SHAPED TEETH UNDER CONDITIONS OF THEIR SKEWING

**Abstract.** In the article on the basis of the solution of the volumetric edge contact problem the method of calculation of the load distributed over the contact area in the meshing of straight and barrel-shaped teeth for the case of their touching in the presence of the skew angle is developed. The method takes into account: the actual function of gaps in the vicinity of the contact point of the tooth surfaces and the location of this point on the surface of a straight or barrel-shaped tooth at a known skew angle; the finite dimensions and bending-sliding deformations of the teeth; edge effects when the contact area "exits" to one or both tooth faces. The results of calculation of contact stress distribution over the contact area for spur gear and gear with barrel-shaped teeth with different value of contact localisation at skew angle variation are presented. The methodology allows to realise the procedure of synthesis of geometry of gears with barrel-shaped teeth in the given conditions of their operation.

**Keywords:** cylindrical gears, straight and barrel-shaped teeth, skew, contact stresses.

## BIBLIOGRAPHY

1. Nakhatakyan F. G. Estimation of the permissible skew angle in gearing / F. G. Nakhatakyan, D. F. Nakhatakyan. - Text: direct // Problems of mechanical engineering and machine reliability. - 2022. - No. 1. - P. 45-49.
2. Sanchez M. Approximate equations for the meshing stiffness and the load sharing ratio of spur gears including hertzian effects / M. Sanchez, M. Pleguezuelos, J. Pedrero. - Direct text // Mechanism and Machine Theory. - 2017. - 109. - P. 231-249.
3. Pedrero J. Analytical Simulation of the Tooth Contact of Spur Gears / J. Pedrero, M. Pleguezuelos, M. Sanchez. - URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-34945-5\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-34945-5_4) (date of the application 26.01.2020). - Text: electronic.
4. Roda-Casanova V. An approach for solving the contact problem in spur gear transmissions considering gear misalignments / V. Roda-Casanova, F. Sanchez-Marin, J. L. Iserte. - Direct text // Proceedings of the ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE 2015). - 2015. Volume: ASME 2015 Power Transmission and Gearing Conference. - P. 1-10.
5. Korotkin V. I. Prediction of contact endurance of hardened teeth and load capacity of involute gears according to the criterion of the limit state of the material / V. I. Korotkin, E. M. Kolosova, N. P. Onishkov. - DOI: 10.36652/0042-4633-2021-12-35-37. - Text: electronic // Bulletin of mechanical engineering. - 2021. - No. 12. - P. 31-35.
6. Nakhatakyan F. G. Increasing the load capacity of a gear transmission under skew conditions by reducing contact stresses using longitudinal modification of teeth / F. G. Nakhatakyan. - DOI: 10.36652/0042-4633-2021-12-13-16. - Text: electronic // Bulletin of mechanical engineering. - 2021. - No. 12. P. 13-16.
7. Doroфеев V. L. Application of the fictitious load method to solve the problem of calculating contact stresses / V. L. Doroфеев. - Text: direct // Modern mechanical engineering. Science and education. - 2016. - No. 5. - P. 390-401.
8. Korotkin V.I. Contact tension of straight teeth of involute gears under conditions of misalignment in the meshing / V.I. Korotkin, D.A. Gazzaev, D.Yu. Sukhov. - Text: direct // News of universities. North Caucasus region. Technical science. - 2011. - No. 4. - P. 83-87.
9. Wen Q. Analytical calculation of the tooth surface contact stress of spur gear pairs with misalignment errors in multiple degrees of freedom / Q. Wen, Q. Du, X. Zhai. - Direct text // Mechanism and Machine Theory. - 2020. - 149. - 103823.
10. Zhou C. Modeling and calculation of impact friction caused by corner contact in gear transmission / C. Zhou, S. Chen. - Direct text // Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition). - 2014. - 27. - P. 958-964.
11. Tamarozzi T. Static modes switching in gear contact simulation / T. Tamarozzi, P. Ziegler, P. Eberhard, W. Desmet. - Direct text // Mechanism and Machine Theory. - 2013. - 63. - P. 89-106.
12. Li S. A tribo-dynamic contact fatigue model for spur gear pairs / S. Li, A. Anisetti. - Direct text // International Journal of Fatigue. - 2017. - 98. - P. 81-91.
13. Lebedev S. Yu. Probability estimate of the strength reliability of toothed wheel gear / S. Yu. Lebedev, V. N. Syzrantsev. - Direct text // Procedia Structural Integrity. - 2023. - 50. - P. 155-162.
14. Syzrantsev V.N. Cylindrical gears with arched teeth: geometry, strength, reliability: monograph / V.N. Syzrantsev, K.V. Syzrantseva. - Tyumen: TIU, 2020. - 171 p. - Text: direct.
15. Syzrantsev V. N. Methods for synthesizing geometric parameters of cylindrical gears with localized contact / V. N. Syzrantsev, V. P. Gorodnichiy. - Text: direct // Bulletin of mechanical engineering. - 1990. - No. 9. - P. 35-37.

**Syzrantsev Vladimir Nikolaevich**

Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia.  
Doctor of Technical Sciences, Professor, Honoured Worker of Sciences of the Russian Federation, Professor of the Department of Machines and Equipment of Oil and Gas Industry  
38, Volodarskogo St., Tyumen, 625000, Tyumen, Russia  
Phone: 8-912-926-59-02  
E-mail: syzrantsevvn@tyuiu.ru

**Syzrantseva Ksenia Vladimirovna**

Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia  
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Machinery and Equipment of Oil and Gas Industry  
38, Volodarskogo St., Tyumen, 625000, Tyumen, Russia  
Phone: 8-912-923-34-03  
E-mail: kv.syzr@gmail.com

**Serdyuk Ivan Sergeevich**

Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia  
Postgraduate student of the Department of Machinery and Equipment of Oil and Gas Industry  
38, Volodarskogo St., Tyumen, 625000, Tyumen, Russia  
Phone: 8-950-485-65-69  
E-mail: serdyuk.ivan.98@mail.ru

© В.Н. Сызранцев, К.В. Сызранцева, И.С. Сердюк, 2024

Е.Н. ГРИБАНОВ, А.И. ГОРШКОВ, Р.Е. ИВАНОВ, Д.В. ДАНИЛЕВИЧ

## КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТИ МОНОКРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ НА РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЯХ МЕХАТРОННЫХ МЕХАНИЗМОВ

**Аннотация.** В работе показана возможность контроля структурных и геометрических параметров монокристаллов кремния методом атомно-силовой микроскопии. Приведены результаты по определению ориентации монокристаллов кремния после его предварительного химического травления, а также контролю шероховатости образцов. Показано уменьшение средней шероховатости ( $R_a$ ) поверхности при химическом травлении, что возможно использовать для химической полировки поверхности кремния. Полученные данные представляют интерес для развития подходов по контролю качества монокристаллов кремния на наноуровне и совершенствования методов химической полировки поверхности полупроводников, используемых в микроэлектронных, микромеханических компонентах роботизированных систем и мехатронных узлах.

**Ключевые слова:** кремний, атомно-силовая микроскопия, шероховатость, травление, кристаллографическая ориентация.

### Введение

Монокристаллы кремния находят широкое применение при производстве микроэлектронных, микромеханических компонентов роботизированных систем и мехатронных узлов. Кремний используют для изготовления оптических элементов, интегральных микросхем, транзисторов, полупроводниковых приборов, а также детектирующих и сенсорных устройств [1-5]. Такое многообразие областей применения данного материала создаёт высокие требования к контролю и мониторингу качества его поверхности [6-8]. Именно состояние поверхности кремния во многом определяет его свойства [9-11]. Качество поверхности кремниевых монокристаллов характеризуют шероховатостью, типом и плотностью дефектов, степенью химической чистоты. К способам контроля качества кремния относят, например, измерение удельного сопротивления кристаллов, селективное травление, ультразвуковой метод, использование металлографической микроскопии [12-15]. Широкие возможности исследования морфологии поверхности материалов даёт метод атомно-силовой микроскопии, позволяющий определить геометрические параметры характерных элементов поверхности на наноуровне.

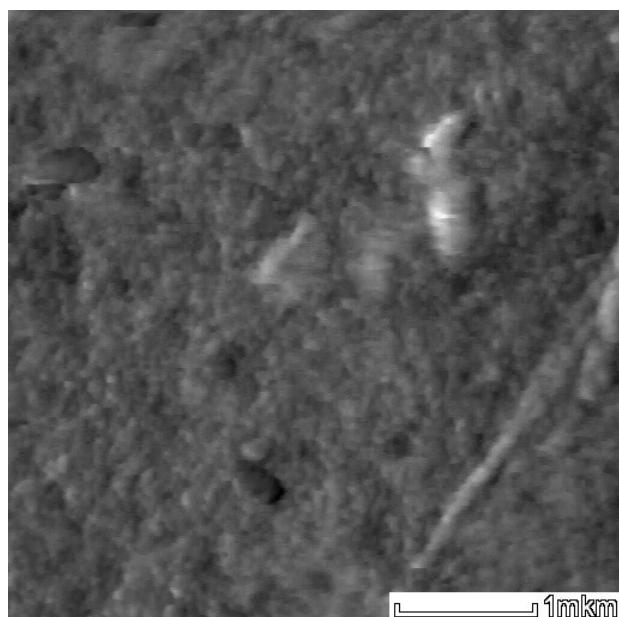
Целью настоящей работы явилось систематическое изучение возможностей применения метода атомно-силовой микроскопии для контроля качества поверхности монокристаллов кремния и определения их характерных геометрических и структурных параметров.

### Основная часть

Кристаллографическая ориентация оказывает решающее влияние на свойства кремния (модуль упругости, скорость травления, прочность, плотность поверхностных состояний и т.д.). Надежный и универсальный метод контроля ориентации монокристалла кремния – определение по фигурам травления. В качестве травителей используют кислотные и щелочные [16, 17]. Системы для травления состоят минимум из двух компонентов. Один из которых окисляет поверхность кремния (например, азотная кислота, оксид хрома(VI)), а второй компонент растворяет образующийся оксид кремния (как правило – плавиковая кислота). Нередко используют третий компонент, который повышает смачиваемость гидрофобной поверхности кремния или повышает вязкость раствора для травления, что способствует замедлению скорости процесса, за счет чего травление протекает более равномерно, а морфология поверхности кремния отличается большей упорядоченностью и равномерностью распределения характерных элементов по геометрическим параметрам.

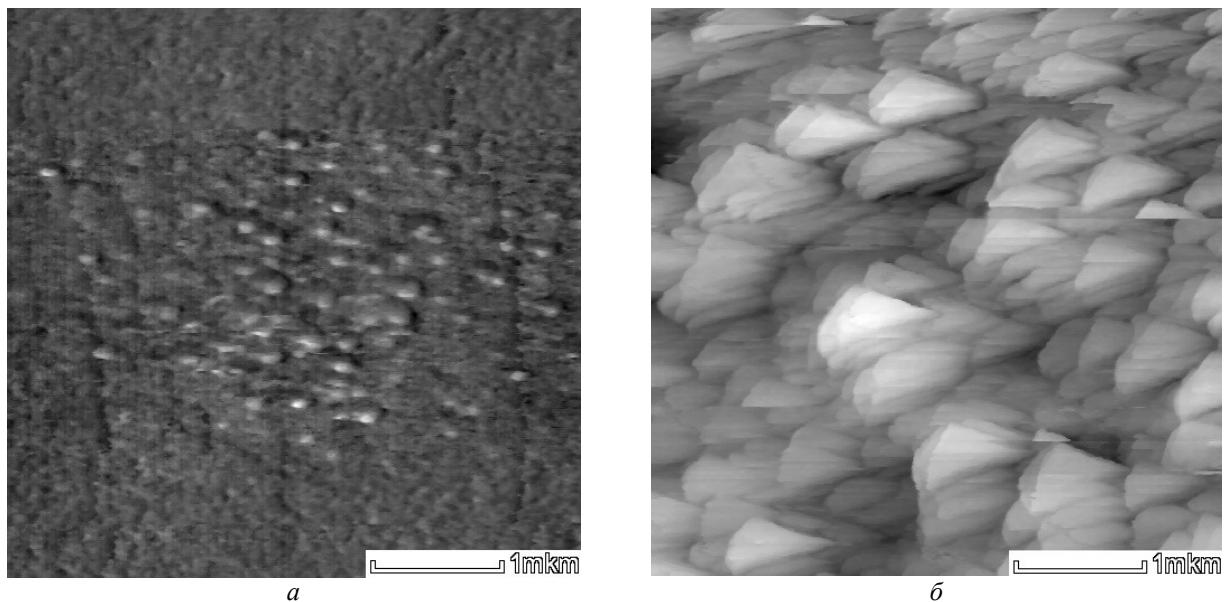
Методика эксперимента включала следующие этапы. Предварительно очищали образцы кремния в этиловом спирте и деионизированной воде. Далее проводили травление в растворах концентрированных азотной ( $HNO_3$ , 67%) и плавиковой (HF, 35%) кислот в объемном соотношении 1:2. Травление проводили в течении 5 – 10 минут. Далее образцы кремния отмывали в деионизированной воде. Для установления фигур травления использовали метод атомно-силовой микроскопии (сканирующий зондовый микроскоп СММ-2000).

Типичное АСМ-изображение поверхности кремния до травления в смеси кислот представлено на рисунке 1.



*Рисунок 1 – АСМ-изображение поверхности монокристалла кремния до травления (4,375 x 4,375 мкм)*

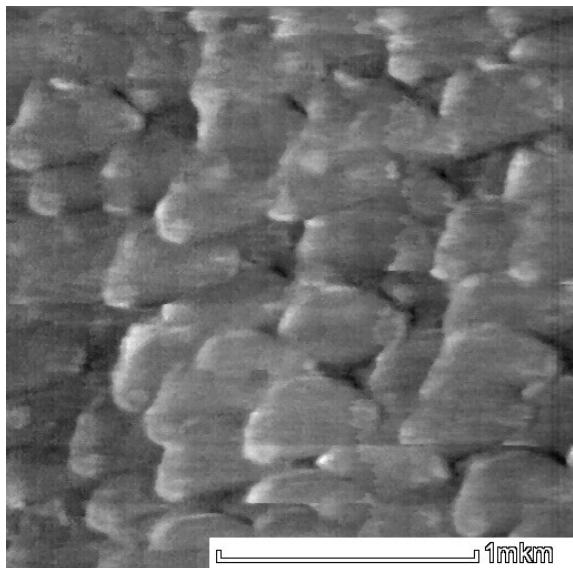
Анализ полученных АСМ-кадров показал, что поверхность представляет неупорядоченную аморфную структуру. Средняя шероховатость поверхности кремния ( $R_a$ ) до обработки травителями рассчитана с помощью программного обеспечения для сканирующего зондового микроскопа СММ-2000 и составила  $\sim 11,98$  нм, что соответствует 13 классу шероховатости.



*Рисунок 2 – АСМ-изображение поверхности монокристалла кремния после кислотного травления в течении 2 минут (а) и 5 минут (б) (4,375 x 4,375 мкм)*

На рисунке 2 представлена поверхность монокристалла кремния после кислотного травления в течении разных промежутков времени. После травления в течении 5 минут на поверхности кремния (рисунок 2б) наблюдается формирование объемные треугольные фигуры травления, что соответствует кристаллографической ориентации [111] для монокристаллов кремния. Формирование данного типа геометрии фигур обусловлено выходом дислокаций на поверхность кремния. Длина ребра треугольника находится в интервале 900 нм – 1 мкм. Таким образом, поверхность кремния после травления представляет из себя упорядоченную структуру, состоящую из объемных треугольных элементов, что свидетельствует о высокой

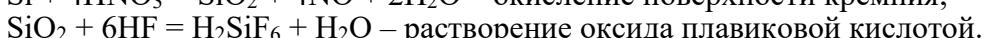
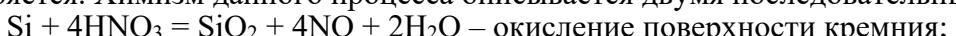
плотности дислокаций. Увеличение времени травления приводит к увеличению количества фигур травления. Шероховатость образцов кремния после травления составила  $\sim 5,45$  нм, что в два раза ниже шероховатости образцов до травления и соответствует 14 классу. Исходная поверхность монокристалла кремния представлена поверхностными включениями, покрыта оксидом кремния, а в процессе травления равномерно снимается верхний слой монокристалла кремния. Обратной стороной этого процесса является образованием менее шероховатого тонкого слоя пористого кремния, поры располагаются между фигурами травления. В случае кислотного травления в течении 2 минут выход дислокаций наблюдается в меньшей степени, дислокации располагаются группой, как на рисунке 1а. Геометрическая форма фигур крайне слабо выражена при одинаковом масштабе АСМ-изображений. На рисунке 3 представлен типичный фрагмент поверхности образца, протравленного в течении 2 минут, но при большем масштабе. Анализ показал, что фигуры также близки к треугольным, но имеют не четко выраженные углы, что, вероятно, обусловлено малой скоростью травления. Длина ребра полученных фигур составляет  $\sim 500$  нм.



*Рисунок 3 – АСМ-изображение поверхности монокристалла кремния после кислотного травления в течении 2 минут (2,188 x 2,188 мкм)*

Таким образом, оптимальным временем травления для выявления кристаллографической ориентации монокристалла кремния по фигурам травления является 5 минут.

Можно предположить следующий механизм кислотного травления монокристаллического кремния. В случае, если кремний покрыт оксидной пленкой, то на первой стадии происходит растворение оксида кремния плавиковой кислотой. Следующим этапом является окисление поверхности азотной кислотой с образованием оксида кремния, который далее снова растворяется плавиковой кислотой. Данный цикл многократно повторяется. Химизм данного процесса описывается двумя последовательными реакциями:



Стоит отметить, что поверхность монокристаллического кремния не является энергетически однородной, следовательно, механизм реакции кислотного травления следует рассматривать с электрохимической позиции. Таким образом, участок поверхности с наибольшим количеством неоднородностей и дефектов выступает в качестве анода, а наиболее однородные участки – в качестве катода. Анодная реакция обуславливает разрушение связей и образование на поверхности оксида  $\text{SiO}_2$  – процесс окисления кремния, катодная реакция – восстановление окислителя. В связи с этим и происходит проявление треугольных дислокаций, а также уменьшение количества неоднородностей поверхности и уменьшение шероховатости. Скорость травления при использовании такой смеси травителей может достигать 28 мкм/мин и зависит от кристаллографической ориентации монокристаллов кремния [18, 19].

Для кристаллографической ориентации [111] характерно медленное протекание процесса травления, т.к. направление [111] является перпендикулярным поверхности

кремниевой подложки и соответствует наименьшей скорости реакции. Поры, образующиеся на поверхности кремния, стремятся расти вглубь под углом, что также обусловлено характером кристаллографического направления [111] и обуславливает форму образующихся фигур травления. Следовательно, при использовании кремниевых подложек другой кристаллографической ориентации фигуры травления будут иметь другую форму и скорость травления [20].

### Заключение

Таким образом, в работе показаны возможности способа определения кристаллографической ориентации и шероховатости поверхности монокристалла кремния методом атомно-силовой микроскопии. Определена ориентация монокристалла кремния. Установлено оптимальное время травления образцов кремния с кристаллографической ориентацией [111]. Показано, что шероховатость поверхности уменьшается вдвое, что указывает на возможность использования данного метода не только для определения ориентации кремния, но и для химической полировки поверхности данного материала, что необходимо в производстве электронных компонентов при отсутствии подложек требуемого качества. Полученные результаты могут быть использованы для развития подходом по контролю качества монокристаллов кремния на наноуровне и совершенствования методов химической полировки поверхности полупроводников, используемых в микроэлектронных, микромеханических компонентах роботизированных систем и мехатронных узлах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Применение реконструированной поверхности кремния для калибровки сканирующих туннельных микроскопов / А. Ю. Кузин, П. А. Тодуа, В. И. Панов, А. И. Орешкин // Измерительная техника. – 2012. – № 7. – С. 26-30.
2. Вергазов, И. Р. Применение анизотропного травления для изготовления преобразователей давления на основе структуры "кремний-на-диэлектрике" / И. Р. Вергазов // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2014. – Т. 2. – С. 169-170.
3. Барышевская, Е. Н. Применение кремния в микроэлектронике / Е. Н. Барышевская // Влияние науки на инновационное развитие: Сборник статей Международной научно-практической конференции, Томск, 25 февраля 2016 года / Ответственный редактор: Сукиасян Асатур Альбертович. Том Часть 3. – Томск: Общество с ограниченной ответственностью "Аэтерна", 2016. – С. 57-58.
4. Беспалов, Е. С. Применение альфа-карбида кремния ( $\alpha$ -SiC) в термоэлектрических полупроводниковых модулях / Е. С. Беспалов, А. Н. Головицкий, П. Е. Голубков // Проблемы автоматизации и управления в технических системах: Сборник статей Международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию Победы в Великой Отечественной войне: в 2 томах, Пенза, 19–21 мая 2015 года / под ред. М.А. Щербакова. Том 1. – Пенза: Пензенский государственный университет, 2015. – С. 271-276.
5. Трегулов, В. В. Пористый кремний: технология, свойства, применение: монография / В. В. Трегулов; В. В. Трегулов; М-во образования и науки Российской Федерации, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования "Рязанский гос. ун-т им. С. А. Есенина". – Рязань: Рязанский гос. ун-т им. С. А. Есенина, 2011. – ISBN 978-5-88006-677-3.
6. Оптимизация контроля качества поликристаллического кремния / Ю. В. Реков, В. З. Кузова, И. Ф. Червоный, О. А. Кисарин // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции. – 2010. – Т. 4, № 1. – С. 41-45.
7. Леньшин, А. С. ИК-спектроскопия для экспресс-контроля качества пористого кремния для нужд оптоэлектроники / А. С. Леньшин, О. В. Черноусова, А. А. Евдокимов // IV Всероссийская конференция по аналитической спектроскопии с международным участием: материалы конференции, Краснодар, 24–30 сентября 2023 года. – Краснодар: Кубанский государственный университет, 2023. – С. 65.
8. Оптический контроль параметров подложек и эпитаксиальных структур карбида кремния / В. В. Лучинин, М. Ф. Панов, М. В. Павлова, Ф. Е. Рыбка // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2022. – Т. 27, № 2. – С. 175-186. – DOI 10.24151/1561-5405-2022-27-2-175-186.
9. Влияние кристаллографической ориентации подложки на зарождение, форму и развитие пор в кремнии при его электрохимическом травлении в растворах фтористоводородной кислоты / Е. Н. Абрамова, Ю. В. Сыров, А. М. Хорт [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2018. – № 3. – С. 93-97. – DOI 10.7868/S0207352818030149.
10. Влияние кристаллографической ориентации кремниевых пластин на механизм их анодирования / Н. Л. Гревцов, А. В. Клименко, А. Д. Гурбо, В. П. Бондаренко // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. – 2020. – Т. 18, № 1. – С. 59-66. – DOI 10.35596/1729-7648-2020-18-1-59-66.
11. Lehmann, Volker Dr. et al. "On the morphology and the electrochemical formation mechanism of mesoporous silicon." Materials Science and Engineering B-advanced Functional Solid-state Materials 69 (2000): 11-22.
12. Леньшин, А. С. ИК-спектроскопия для экспресс-контроля качества пористого кремния для нужд оптоэлектроники / А. С. Леньшин, О. В. Черноусова, А. А. Евдокимов // IV Всероссийская конференция по аналитической спектроскопии с международным участием: материалы конференции, Краснодар, 24–30 сентября 2023 года. – Краснодар: Кубанский государственный университет, 2023. – С. 65.

13. Патент № 2150158 С1 Российской Федерации, МПК H01L 21/66. способ контроля дефектности пленок кремния на диэлектрических подложках: № 99103577/28: заявл. 22.02.1999: опубл. 27.05.2000 / Н. Д. Латышева, В. Д. Скупов, В. К. Смолин; заявитель Научно-исследовательский институт измерительных систем.
14. Люшнин, А. В. Метрологическое обеспечение входного контроля кремниевых пластин / А. В. Люшнин, С. В. Кунев // XLVIII Огарёвские чтения: Материалы научной конференции. В 3-х частях, Саранск, 06–13 декабря 2019 года / Составитель А.В. Столяров. Отв. за выпуск П.В. Сенин. Том Часть 1. – Саранск: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, 2020. – С. 207-212.
15. Применение инфракрасной термографии для диагностики слитков кремния / В. А. Юрьев, В. П. Калинушкин, А. П. Лыткин, С. И. Ляпунов // Микроэлектроника. – 2004. – Т. 33, № 6. – С. 429-432.
16. Сангвал К. Травление кристаллов. – М.: Мир, 1990. – с. 404 – 428.
17. Пичугин И.Г., Таиров Ю.М. Технология полупроводниковых приборов. – М.: Высшая школа, 1984. – с. 43 – 71.
18. Бабанов, Ю. Е. Механизмы поверхностных процессов при спонтанном травлении кремния атомами фтора: специальность 05.27.01 "Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах": автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Бабанов Юрий Евгеньевич. – Черноголовка, 1994. – 20 с.
19. Родионов, Ю. А. Анализ основных механизмов, определяющих качество жидкостного травления кремния / Ю. А. Родионов, А. Г. Смирнов, А. А. Степанов // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. – 2017. – Т. 7, № 3. – С. 95-102.
20. Улин, В. П. Анондные процессы в условиях химического и электрохимического травления кристаллов кремния в кислых фторидных растворах. Механизм порообразования / В. П. Улин, Н. В. Улин, Ф. Ю. Солдатенков // Физика и техника полупроводников. – 2017. – Т. 51, № 4. – С. 481-496. – DOI 10.21883/FTP.2017.04.44340.8393.

**Грибанов Евгений Николаевич**  
ФГБОУ ВО ОГУ им. И.С. Тургенева  
Адрес: г. Орел, ул. Комсомольская, 95  
к.х.н., доцент, зав. кафедрой химии  
E-mail: gribanoven@gmail.com

**Иванов Роман Евгеньевич**  
ФГБОУ ВО ОГУ им. И.С. Тургенева  
Адрес: г. Орел, ул. Комсомольская, 95  
студент

**Горшков Александр Игоревич**  
ФГБОУ ВО ОГУ им. И.С. Тургенева  
Адрес: г. Орел, ул. Комсомольская, 95  
старший преподаватель  
E-mail: gorshkov.a.i@yandex.ru

**Данилевич Денис Владимирович**  
ФГБОУ ВО ОГУ им. И.С. Тургенева  
Адрес: г. Орел, ул. Комсомольская, 95  
начальник Управления научных  
и инновационных проектов

E.N. GRIBANOV, A.I. GORSHKOV, R.E. IVANOV, D.V. DANILEVICH

## CONTROL OF QUALITY AND GEOMETRICAL PARAMETERS OF THE SURFACE OF SILICON MONOCRYSTALS BY ATOMIC FORCE MICROSCOPY ON THE WORKING SURFACES OF MECHATRONIC MECHANISMS

**Abstract.** The paper shows the possibility of controlling the structural and geometric parameters of silicon single crystals by atomic force microscopy. The results of determining the orientation of silicon single crystals after its preliminary chemical etching, as well as control of the roughness of the samples, are presented. It is shown that the average surface roughness ( $R_a$ ) decreases during chemical etching, which can be used for chemical polishing of the silicon surface. The obtained data are of interest for the development of approaches to quality control of silicon single crystals at the nanoscale and improvement of methods for chemical polishing of the surface of semiconductors used in microelectronic, micromechanical components of robotic systems and mechatronic nodes.

**Keywords:** silicon, atomic force microscopy, roughness, etching, crystallographic orientation..

## BIBLIOGRAPHY

1. Применение реконструированной поверхности кремниевого слоя для калибровки сканирующей туннельной микроскопии / А. Ю. Кузин, П. А. Тодуа, В. И. Панов, А. И. Орешкин // Известия ОГУ им. И. С. Тургенева. – 2012. – № 7. – С. 26-30.
2. Vergazov, I. R. Применение анизотропного травления для изготавления преобразователей давления на основе структуры "кремниевый-диэлектрик" / I. R. Vergazov // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2014. – Т. 2. – С. 169-170.
3. Baryshevskaya, E. N. Применение кремниевого слоя в микротехнологии / E. N. Baryshevskaya // Влияние науки на инновационное развитие: Сборник материалов Международной научно-практической конференции, Томск, 25 февраля 2016 года / Ответственный редактор: Сукиасян Асатур Альбертович. Том Част' 3. – Томск: Общество с ограниченной ответственностью "Аетерна", 2016. – С. 57-58.
4. Bespalov, E. S. Применение алфа-карбидного кремниевого слоя ( $\alpha$ -SiC) в полупроводниковых модулях / E. S. Bespalov, A. N. Golovashkin, P. E. Golubkov // Проблемы автоматизации и управления в технических системах: Сборник материалов Международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию Победы в Великой Отечественной войне: в 2 томах, Пенза, 19–21 мая 2015 года / под ред. М. А. Шербакова. Том 1. – Пенза: Пензенский государственный университет, 2015. – С. 271-276.

5. Tregulov, V. V. Poristyj kremnij: tekhnologiya, svojstva, primenie: monografiya / V. V. Tregulov; V. V. Tregulov; M-vo obrazovaniya i nauki Rossijskoj Federacii, Gos. obrazovatel'noe uchrezhdenie vyssh. prof. obrazovaniya "Ryazanskij gos. un-t im. S. A. Esenina". – Ryazan': Ryazanskij gos. un-t im. S. A. Esenina, 2011. – ISBN 978-5-88006-677-3.
6. Optimizaciya kontrolya kachestva polikristallicheskogo kremniya / Yu. V. Rekov, V. Z. Kucova, I. F. Chervonyj, O. A. Kisarin // Sbornik nauchnyh trudov po materialam mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. – 2010. – T. 4. – № 1. – S. 41-45.
7. Len'shin, A. S. IK-spektroskopiya dlya ekspress-kontrolya kachestva poristogo kremniya dlya nuzhd optoelektroniki / A. S. Len'shin, O. V. Chernousova, A. A. Evdokimov // IV Vserossijskaya konferenciya po analiticheskoy spektroskopii s mezhdunarodnym uchastiem: materialy konferencii, Krasnodar, 24–30 sentyabrya 2023 goda. – Krasnodar: Kubanskij gosudarstvennyj universitet, 2023. – S. 65.
8. Opticheskij kontrol' parametrov podlozhek i epitaksial'nyh struktur karbida kremniya / V. V. Luchinin, M. F. Panov, M. V. Pavlova, F. E. Rybka // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Elektronika. – 2022. – T. 27, № 2. – S. 175-186. – DOI 10.24151/1561-5405-2022-27-2-175-186.
9. Vliyanie kristallograficheskoy orientacii podlozhki na zarozhdenie, formu i razvitiye por v kremniy pri ego elektrohimicheskem travlenii v rastvorah ftoristovodorodnoj kisloty / E. N. Abramova, Yu. V. Syrov, A. M. Hort [i dr.] // Poverhnost'. Rentgenovskie, sinhrotronnye i nejtronnye issledovaniya. – 2018. – № 3. – S. 93-97. – DOI 10.7868/S0207352818030149.
10. Vliyanie kristallograficheskoy orientacii kremnievih plastin na mekhanizm ih anodirovaniya / N. L. Grevcov, A. V. Klimenko, A. D. Gurbo, V. P. Bondarenko // Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki. – 2020. – T. 18, № 1. – S. 59-66. – DOI 10.35596/1729-7648-2020-18-1-59-66.
11. Lehmann, Volker Dr. et al. "On the morphology and the electrochemical formation mechanism of mesoporous silicon." Materials Science and Engineering B-advanced Functional Solid-state Materials 69 (2000): 11-22.
12. Len'shin, A. S. IK-spektroskopiya dlya ekspress-kontrolya kachestva poristogo kremniya dlya nuzhd optoelektroniki / A. S. Len'shin, O. V. Chernousova, A. A. Evdokimov // IV Vserossijskaya konferenciya po analiticheskoy spektroskopii s mezhdunarodnym uchastiem: materialy konferencii, Krasnodar, 24–30 sentyabrya 2023 goda. – Krasnodar: Kubanskij gosudarstvennyj universitet, 2023. – S. 65.
13. Patent № 2150158 C1 Rossijskaya Federaciya, MPK H01L 21/66. sposob kontrolya defektnosti plenok kremniya na dielektricheskikh podlozhkakh: № 99103577/28: zayavl. 22.02.1999: opubl. 27.05.2000 / N. D. Latysheva, V. D. Skupov, V. K. Smolin; zayavitel' Nauchno-issledovatel'skij institut izmeritel'nyh sistem.
14. Lyushnin, A. V. Metrologicheskoe obespechenie vhodnogo kontrolya kremnievih plastin / A. V. Lyushnin, S. V. Kunev // XLVIII Ogaryovskie chteniya: Materialy nauchnoj konferencii. V 3-h chastyah, Saransk, 06–13 dekabrya 2019 goda / Sostavitel' A.V. Stolyarov. Otv. za vypusk P.V. Senin. Tom Chast' 1. – Saransk: Nacional'nyj issledovatel'skij Mordovskij gosudarstvennyj universitet im. N.P. Ogaryova, 2020. – S. 207-212.
15. Primenenie infrakrasnoj termografii dlya diagnostiki slitkov kremniya / V. A. Yur'ev, V. P. Kalinushkin, A. P. Lytkin, S. I. Lyapunov // Mikroelektronika. – 2004. – T. 33, № 6. – S. 429-432.
16. Sangval K. Travlenie kristallov. – M.: Mir, 1990. – s. 404 – 428.
17. Pichugin I.G., Tairov Yu.M. Tekhnologiya poluprovodnikovyh priborov. – M.: Vysshaya shkola, 1984. – s. 43 – 71.
18. Babanov, Yu. E. Mekhanizmy poverhnostnyh processov pri spontannom travlenii kremniya atomami ftora: special'nost' 05.27.01 "Tverdotel'naya elektronika, radioelektronnye komponenty, mikro- i nanoelektronika, pribory na kvantovyh effektah": avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata fiziko-matematicheskikh nauk / Babanov Yurij Evgen'evich. – Chernogolovka, 1994. – 20 s.
19. Rodionov, Yu. A. Analiz osnovnyh mekhanizmov, opredelyayushchih kachestvo zhidkostnogo travleniya kremniya / Yu. A. Rodionov, A. G. Smirnov, A. A. Stepanov // Izvestiya Kabardino-Balkarskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2017. – T. 7, № 3. – S. 95-102.
20. Ulin, V. P. Anodnye processy v usloviyah himicheskogo i elektrohimicheskogo travleniya kristallov kremniya v kislyh ftoridnyh rastvorah. Mekhanizm poroobrazovaniya / V. P. Ulin, N. V. Ulin, F. Yu. Soldatenkov // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. – 2017. – T. 51, № 4. – S. 481-496. – DOI 10.21883/FTP.2017.04.44340.8393.

**Gribanov Evgeny Nikolaevich**

OSU named after I.S. Turgenev

Address: Orel, Komsomolskaya str., 95

Candidate of Chemical Sciences, associate professor, head of the department of Chemistry

E-mail: gribanoven@gmail.com

**Ivanov Roman Evgen'evich**

OSU named after I.S. Turgenev

Address: Orel, Komsomolskaya str., 95

student

**Gorshkov Aleksander Igorevich**

OSU named after I.S. Turgenev

Address: Orel, Komsomolskaya str., 95

senior lecturer

E-mail: gorshkov.a.i@yandex.ru

**Danilevich Denis Vladimirovich**

OSU named after I.S. Turgenev

Address: Orel, Komsomolskaya str., 95

Head of the Scientific Directorate and innovative projects

М.Г. ЛИТОВЧЕНКО, Д.В. ШУТИН

## ПРОГРАММНО-АППАРАТНАЯ СИСТЕМА ПОЛУАКТИВНОЙ СМАЗКИ ТРИБОТРОННЫХ ОПОР ЖИДКОСТНОГО ТРЕНИЯ

**Аннотация.** Активная смазка гидростатодинамических опор позволяет воздействовать на динамические и трибологические параметры роторной системы посредством раздельного регулирования давления подачи смазочного материала в питающие камеры подшипника. Для целей проведения экспериментальных исследований таких систем на экспериментальной установке применены сервоклапаны с электрическим приводом постоянного тока. Обратная связь в гидравлических контурах реализуется с использованием датчиков давления. Система также может сопрягаться с датчиками виброперемещений вала для контроля его положения в подшипнике. Для замкнутого регулирования давления смазочного материала и положения ротора разработан и реализован программно-аппаратный контроллер для управления сервоклапанами на базе ПИД-регулятора. Контроллер принимает от управляющего устройства более высокого уровня сигналы с заданием требуемых значений выходных параметров по нескольким параллельным каналам. Разработанные программно-аппаратные средства управления устанавливают регулирующий механизм сервоклапанов в положения, обеспечивающие заданные значения параметров на выходе. Результаты демонстрируют способность разработанной системы выполнять регулирующие функции с приемлемым быстродействием и качеством переходного процесса, включая отсутствие перерегулирования в ответ на изменяющееся значение уставки.

**Ключевые слова:** сервоклапаны, системы управления, роторные системы, активные подшипники, контроллеры.

### Введение

Активные подшипники обладают способностью оказывать положительное воздействие на динамические и трибологические характеристики роторно-опорных систем при реализации корректно выбранных стратегий управления. В случае активной смазки силовое воздействие на ротор обеспечивается регулируемым давлением подачи смазочного материала в зону трения [1]. В гидростатодинамических активно смазываемых подшипниках может быть реализовано регулирование давления как в общем коллекторе [2], так и раздельно в каждом смазочном канале или их группах [3]. Во всех случаях для регулирования параметров подачи смазочного материала применяются регулируемые клапаны.

Различные конструкции сервоклапанов соответствуют особенностям различных областей их применения. Быстродействующие распределители-регуляторы с прямым [4,5] или пилотным [6,7] приводом имеют высокие динамические характеристики и могут применяться для систем активного виброгашения в роторных машинах. Однако их высокая стоимость ограничивает сферу их применения наиболее ответственными и дорогостоящими роторными системами, такими как мощные турбины [8], турбокомпрессоры [9,10], турбогенераторы [11,12]. Более простые клапаны, например, седельные [13,14], при невысокой стоимости имеют существенно худшие динамические характеристики [15,16] и не могут применяться в следящих регуляторах. Вместе с тем, даже при низких частотах управляющих воздействий активные подшипники способны качественно улучшать ключевые показатели работы роторных систем, такие как минимальная толщина смазочной пленки [17], вязкое трение в опорах [18].

Сервоклапаны, оснащенные встроенной пропорциональной системой регулирования исполнительным устройством [19, 20], достаточно просты в управлении. Для интеграции их в систему управления активными опорами требуется информация об их статической и динамической характеристике, а в части аппаратной реализации – обеспечение электрического питания, а также аналогового или цифрового управляющего сигнала от контроллера верхнего уровня. В случае с исполнительным устройством интегрирующего типа, например, на основе двигателя постоянного тока, дополнительно возникает задача управления сервоклапаном, чтобы обеспечить его работу в пропорциональном режиме.

Данная работа показывает решение такой задачи на примере системы управления

активным гидростатодинамическим подшипником в составе экспериментальной установки по исследованию роторных систем. Статья показывает подход к построению контроллера сервоклапанов и алгоритмов реализации пропорционального режима работы сервоклапана. Решена проблема учета нелинейного поведения сервоклапана и узкой зоны пропорциональности, обусловленной конструкцией запорного устройства шарового типа. Работоспособность решения проверена на задаче стабилизации давления в питающем канале при изменении уставки.

### Экспериментальная установка

Внешний вид и состав экспериментальной установки для исследования трибологических характеристик в гидростатодинамическом подшипнике с активной подачей смазочного материала показан на рисунке 1.

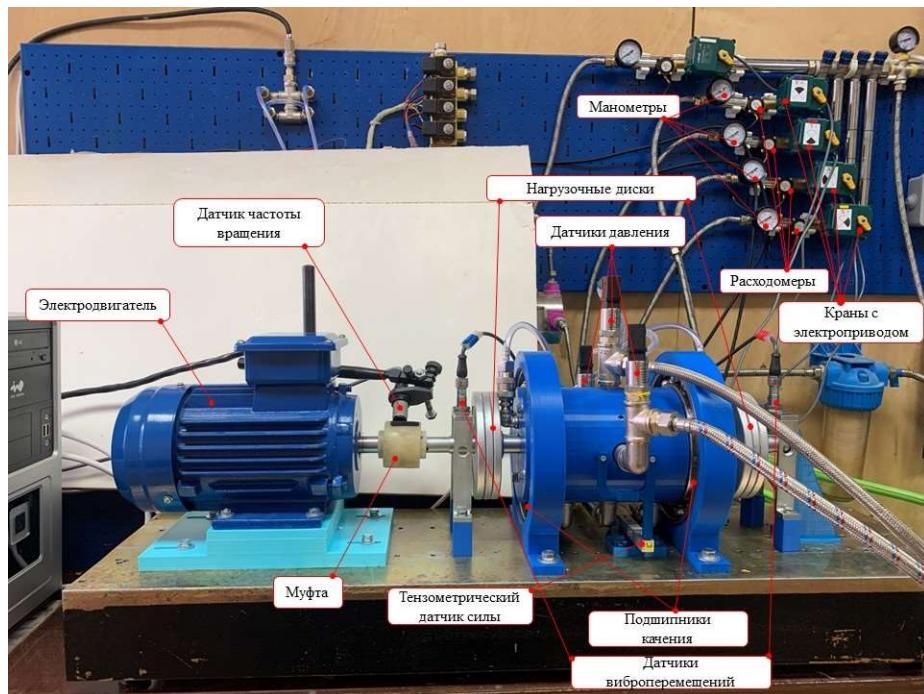


Рисунок 1 – Внешний вид и компоновка экспериментального стенда с АГСДП

Используемая установка содержит ротор, опирающийся на один гидростатодинамический подшипник скольжения и приводящий его во вращение через зубчатую муфту электродвигатель. Корпус подшипникового узла имеет возможность свободно вращаться в подшипниках качения и передавать момент сопротивления вращению вала, возникающий в результате трения в смазочном слое, на тензометрический датчик силы для дальнейшей регистрации его показателей. Дополнительная нагрузка на ротор создается установленными на него нагрузочными дисками, радиальные перемещения измеряются вихревоковыми датчиками. Нагрузочные диски расположены относительно подшипника скольжения симметрично, благодаря чему центр масс ротора совпадает с геометрическим центром подшипника.

Вода, выступающая в роли смазочного материала, передается, подается в подшипник скольжения по четырем каналам раздельно, что позволяет устанавливать в каждом из них требуемое давление. Раздельная регулировка давления подачи смазочного материала производится с помощью управления сервоклапанами с электроприводом, в качестве исполнительного механизма в них применяется шаровая запорная арматура. Гидравлическая схема системы подачи смазочного материала показана на рисунке 2.

Смазочная жидкость подается в каналы подачи смазки с помощью насоса, общее давление подачи ограничивается настройками предохранительного клапана. Каждый канал подачи смазочного материала содержит регулирующий клапан с электроприводом, расходомер, стрелочный манометр для визуального контроля и датчик давления.

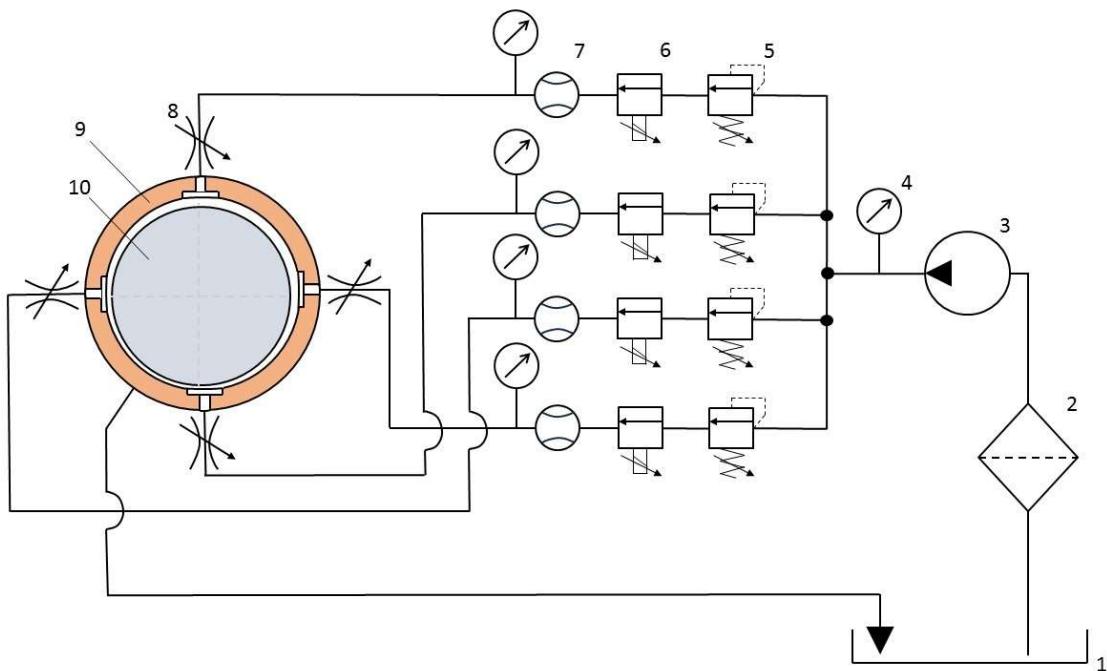


Рисунок 2 – Гидравлическая схема системы подачи смазочного материала:

1 – ёмкость со смазочным материалом; 2 – фильтр; 3 – насос; 4 – манометр; 5 – предохранительный клапан; 6 – регулирующий клапан с электроприводом; 7 – расходомер; 8 – дроссель; 9 – активный гидростатодинамический подшипник, 10 – вал

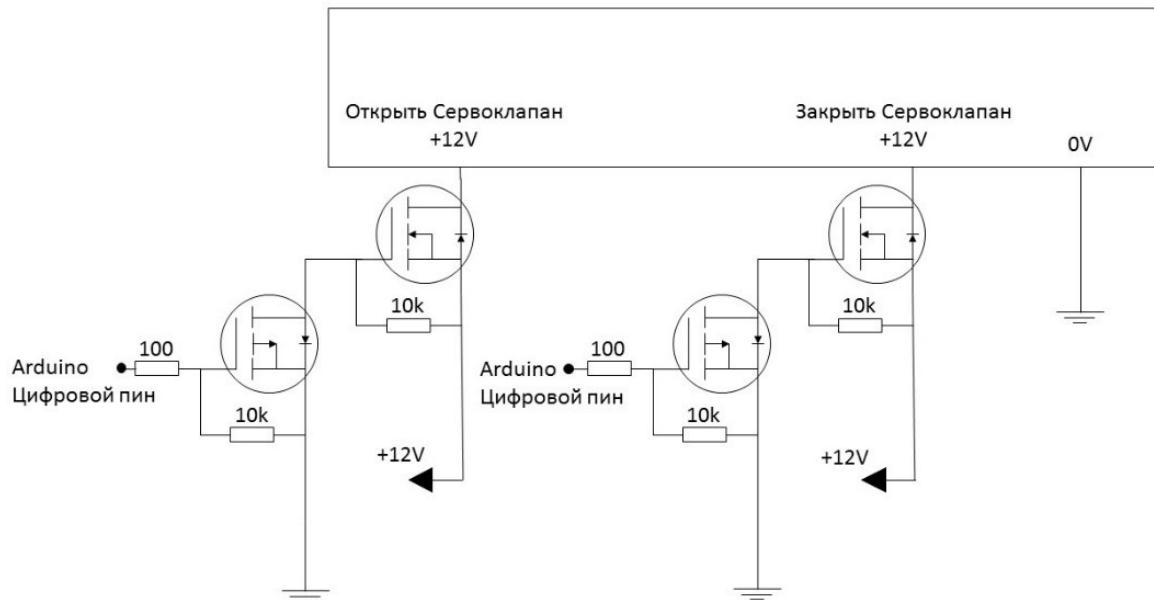


Рисунок 3 – Принципиальная электрическая схема подключения шарового крана с электроприводом

В качестве регулирующих клапанов использованы клапаны с электроприводом Bugatti Pro 12V ½ с исполнительным устройством шарового типа. Модуль электропривода позволяет принимать команды на открытие и закрытие клапана сигналами постоянного тока с номинальным напряжением 12 В. Мощность управляющего устройства сервоклапана составляет 1,4 Вт, время открытия составляет  $20 \pm 1$  с.

Выходное давление в каждом канале считывается преобразователем давления PPT10 PPT-G-ST-016-0-10-1-1. Он в форме унифицированного сигнала напряжения передает текущее значение давления на контроллер ATmega328 на платформе Arduino UNO, которая используется в качестве драйвера регулирующих клапанов и выполняет функции регулятора давления в питающих каналах. Контроллер регулирующих клапанов имеет также и аналоговые

входы, принимающие от системы управления более высокого уровня сигналы уставки давлений в питающих каналах.

Схемотехническое сопряжение контроллера на базе Arduino Uno с реализовано с использованием полевых транзисторов с изолированным затвором, выступающих усилительными элементами. Каскадная схема применена для сопряжения транзисторных элементов p-n-p и n-p-n типов, что требуется для реализации трехпозиционной схемы управления регулирующими клапанами с общим нулевым проводом. Принципиальная электрическая схема подключения одного регулирующего клапана показана на рисунке 3.

При управлении с дискретного выхода контроллера на затвор N-канального полевого транзистора подаётся сигнал 5V. Вследствие этого замыкается электрическая цепь, и от источника питания 12V подаётся напряжение на затвор P-канального транзистора, регулирующий клапан приводится в движение. Резисторы 100 Ом служат защитой контроллера от высокого тока при открытии N-канального транзистора. Резисторы 10 кОм являются подтягивающими и исключают самопроизвольное срабатывание и замыкание цепи.

#### Описание принципа регулирования

Задачей управления является установка заданного давления подачи смазочного материала в каждом канале отдельно. Для этого реализована система с обратной связью. На контроллер поступает управляющий сигнал, задающий требуемое давление в каждом смазочном контуре. Если при помощи преобразователей давления выявляется разница фактического и требуемого значений давления в канале, регулирующие клапаны приводятся в движение, изменяя параметры подачи смазочного материала.

В изначальной постановке регулирование давления было реализовано с помощью пропорционального регулятора, математическое выражение которого следующее:

$$\varepsilon(t) = |y_0(t) - y(t)|, \quad (1)$$

$$z(t) = K_p \cdot \varepsilon(t), \quad (2)$$

где  $\varepsilon(t)$  – сигнал ошибки (рассогласования) в контуре управления,

$y_0(t)$  – сигнал уставки,

$y(t)$  – сигнал о фактическом значении давления в контуре,

$K_p$  – коэффициент усиления пропорционального регулятора,

$z(t)$  – выходной (управляющий) сигнал пропорционального регулятора.

Поскольку регулирующие клапаны обладают интегрирующими свойствами, то для реализации управляющих воздействий согласно (2) требуется переход к импульсным воздействиям, где скважность сигнала пропорциональна управляющему сигналу:

$$\xi(z) = 0,05 \cdot K_p \cdot |y_0(t) - y(t)|$$

Первоначально для системы управления были установлены значения периода 500 мс,  $K_p = 0,1$ . Примеры переходных процессов для различных значений уставок представлены на рисунке 4.

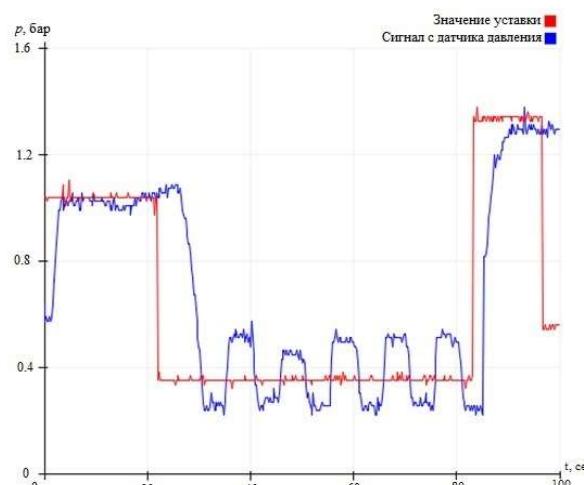


Рисунок 4 – Управление давлением подачи смазочного материала Р-регулятором

Если в диапазонах уставок  $y_0$  более 0,6 бар и менее 0,3 бар регулятор показывал стабильную работу, то в пределах указанных границ, т.е.  $0,3 < y_0 < 0,6$  бар наблюдались существенные колебания регулируемой переменной. Это вызвано существенно нелинейными характеристиками используемых регулирующих клапанов. Наибольшая чувствительность к управляющему сигналу наблюдается на достаточно малом участке, соответствующем указанному диапазону. В этих пределах при сравнительно малом открытии исполнительного клапана происходит значительное изменение давления. Была построена характеристика шарового крана, показывающая изменение давления при открытии крана с временным шагом 0,2 секунды (рисунок 5).

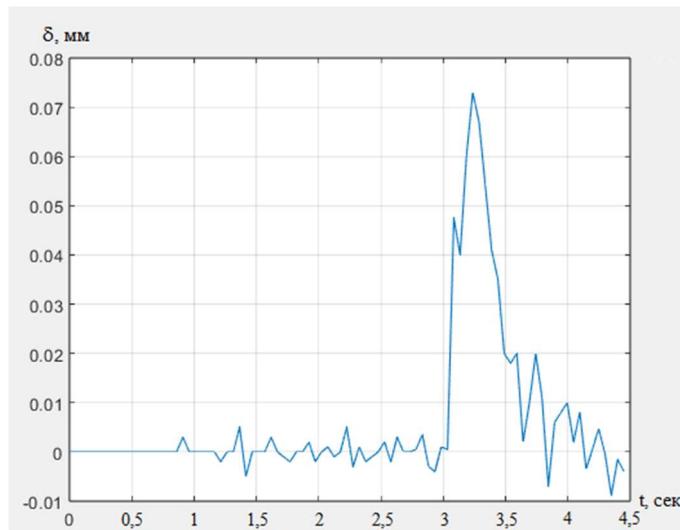


Рисунок 5 – Характеристика шарового крана с электроприводом

Для повышения точности регулирования и исключения колебательных процессов в закон регулирования была добавлена корректирующая функция для снижения чувствительности системы к управляющим сигналам в заданном диапазоне. Закон управления (2) в модифицированном виде принял вид:

$$z(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) \cdot \alpha(y), \quad (2)$$

где  $\alpha(y) = \frac{5}{\varepsilon(t)}$  – корректирующая функция.

Первоначальной целью введения корректирующей функции является снижение чувствительности исполнительного органа в целевом диапазоне. При приближении давления  $y(t)$  к уставке  $y_0(t)$  скважность понижается, что позволяет снизить перемещения исполнительного органа, и тем самым исключить перерегулирование и колебания. Недостатком снижения чувствительности является сопутствующее снижение быстродействия системы управления. Кроме того, данная корректирующая функция не учитывает наличие интервалов повышенной чувствительности, индивидуальных для каждого шарового крана. Для нормализации быстродействия был применен нелинейный закон управления (4), а для компенсации сверхчувствительности изменена корректирующая функция, которая теперь зависит от значения точки пика зоны высокой чувствительности (3):

$$\begin{aligned} \alpha(y) &= -K_r \cdot (y(t) - h)^2, \\ z(t) &= K_p \cdot \varepsilon(t)^2 \end{aligned} \quad (3)$$

С такими изменениями скважность рассчитывается следующим образом:

$$\xi(z) = z(t) - \alpha(y)$$

Итоговый график зависимости скважности от ошибки регулирования показан на рисунке 6.

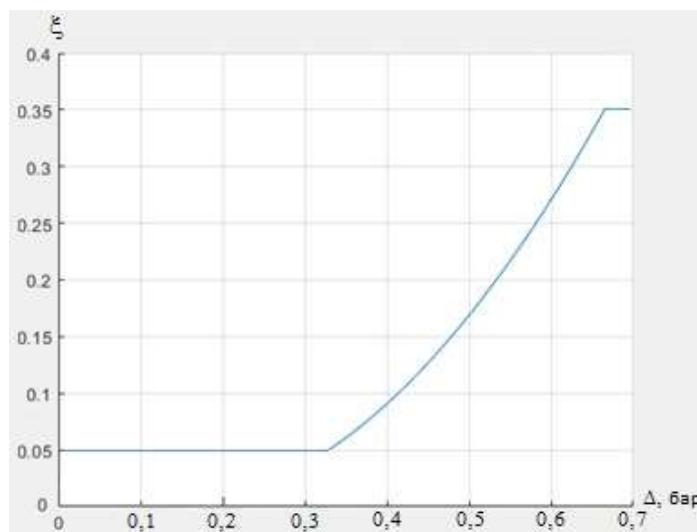


Рисунок 6 – Зависимость скважности от ошибки регулирования

Управление подачей смазочного материала при применении модифицированного закона управления показано на рисунке 7.

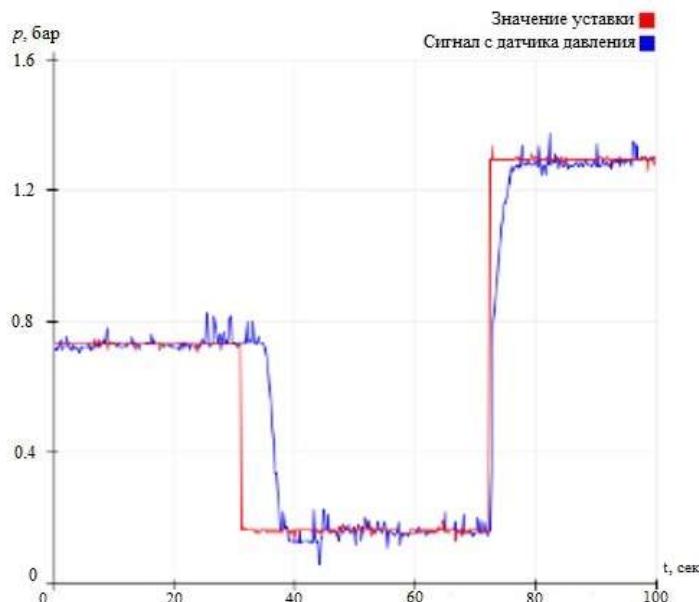


Рисунок 7 – Управление давлением подачи смазочного материала модифицированным Р-регулятором с корректирующей функцией

Введение корректирующей функции в закон управления позволило устраниить нежелательные колебания в диапазоне наибольшей чувствительности исполнительного органа. Кроме того, по сравнению с первоначальной системой также несколько возросло быстродействие системы, типичное время переходного процесса при изменении уставки составило 3-6 сек. Достигнутые показатели являются приемлемыми для реализации принципов статического (полуактивного) регулирования положения ротора в активных гидростатодинамических подшипниках и управления трибологическими режимами работы роторно-опорной системы.

### Заключение

В ходе исследования была разработана программно-аппаратная система индивидуального управления давлением подачи смазочного материала активного гидростатодинамического подшипника скольжения с четырьмя раздельными питающими каналами. Система реализована на установке по исследованию трибологических

характеристик активного гидростатодинамического подшипника скольжения. Разработанная система обеспечивает установление и поддержание заданных уровней давления смазочного материала в питающих каналах благодаря применению регулирующих электрогидравлических клапанов. Для них было реализовано импульсное управление на базе пропорционального регулятора. Также на основание экспериментально полученной передаточной характеристики клапана была разработана корректирующая функция, компенсирующая избыточную чувствительность и недостаточную скорость его работы в различных диапазонах выходного сигнала. Разработанная система управления позволила устанавливать требуемое давление с погрешностью менее 0.05 бар с типичной длительностью переходных процессов в пределах 3-6 секунд, что удовлетворяет требованиям реализации статического (полуактивного) управления в активно смазываемых опорах скольжения.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №22-79-00289, <https://rscf.ru/project/22-79-00289/>.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савин Л.А. Гибридные подшипники жидкостного трения / Савин Л.А., Марахин Н.А., Нгуен Тхай Ха, Лю Ифань, Казаков Ю.Н. // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2023. - № 6(362). С. 108-116.
2. Фетисов А.С. Экспериментальная оценка характеристик триботронных опор роторов / Фетисов А.С., Родичев А.Ю., Литовченко М.Г., Шутин Д.В. // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2024. - № 1(363). С. 52-60.
3. Шутин Д.В. Управление сервоклапанами для реализации активной смазки гидростатодинамических подшипников / Шутин Д.В., Настепанин К.К. // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2023. - № 3(359). С. 137-144.
4. Сервоклапан с электроприводом AQUABAST 12B // Бастион URL: <https://bast.ru/products/aquabast/> (дата обращения: 08.05.2023).
5. Беспроводной сервоклапан с электроприводом ArmaControl -5 // Армасток URL: <https://armastock.ru/besprovodnaya-wi-fi-sistema-zashchity-ot-protechki-vody-armacontrol-5-s-odnim-wifi-sharovym-kranom> (дата обращения: 08.05.2023).
6. Сервоклапан с электроприводом AR24 // SPUTNIK URL: <https://privod-sputnik.ru/wp-content/uploads/2023/04/kran-s-elektroprivodom-SPUTNIK-AR24-230-K2-DN-15-25.pdf> (дата обращения: 08.05.2023).
7. Сервоклапан с электроприводом Rotork, PN 16-40 // Techmarket URL: <https://www.techmarcet.ru/krany-sharovye/krany-sharovye-s-elektroprivodom/kran-sharovyy-TEMPERstalnoystandartnoprohodnoyflancevyys-elektroprivodom-RotorkPN-16-40-bar/> (дата обращения: 08.05.2023).
8. 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.
9. Патент № 2717197 С2 Российская Федерация, МПК F01P 1/08, F01P 7/02, F02B 37/18. Система турбокомпрессора и способ (варианты) охлаждения регулятора давления в системе турбокомпрессора: № 2016104236: заявл. 10.02.2016: опубл. 18.03.2020 / Ш. Ш. Д. Ямада, Т. Д. Гарднер, К. Д. Тиэрнен [и др.]; заявитель Форд Глобал Текнолоджиз, ЛЛК.
10. Патент на полезную модель № 170055 У1 Российская Федерация, МПК G01P 3/00. Устройство для одновременного измерения частоты вращения вала турбокомпрессора и разряжения воздуха в диффузоре турбокомпрессора: № 2016139430: заявл. 10.10.2016: опубл. 12.04.2017 / Ю. И. Беляев, В. А. Перминов, Т. В. Трепачева; заявитель Акционерное общество "Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава" (АО "ВНИКТИ").
11. Авторское свидетельство № 188551 А1 СССР, МПК G01R 23/02, H02J 3/24, G01R 29/18. Способ определения несинхронного хода и знака скольжения турбогенератора или части турбогенераторов энергосистемы: № 928317/24-7: заявл. 09.11.1964: опубл. 01.11.1966 / Е. И. Загоскин.
12. Типко, А. И. Распределение электромагнитных вибровозбуждающих сил статора мощного турбогенератора / А. И. Типко, А. Н. Мельник // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. – 2014. – № 37. – С. 39-44.
13. Сервоклапан с электроприводом ALSO Г3 // Техмаркет URL: <https://www.techmarcet.ru/krany-sharovye/krany-sharovye-s-elektroprivodom/kran-sharovyy-ALSO-stalnoy-standart-s-elektroprivodom-gz-pn-16-40-bar/> (дата обращения: 08.05.2023).
14. Сервоклапан с электроприводом NAVAL Auma // Техмаркет URL: <https://www.techmarcet.ru/krany-sharovye/krany-sharovye-s-elektroprivodom/kran-sharovyy-NAVALstalnoystandartnoprohodnoyflancevyys-elektroprivodom-AumaPN-16-40-bar/> (дата обращения: 08.05.2023).
15. Сервоклапан с электроприводом BELIMO 16 // Техмаркет URL: <https://www.techmarcet.ru/krany-sharovye/krany-sharovye-s-elektroprivodom/kran-sharovyy-BELIMOlattyunnyystandartnoprohodnoymuftovyyys>

elektroprivodomPN-16-barshveycariya/ (дата обращения: 08.05.2023).

16. Сервоклапан с электроприводом ALSO, BERNARD CONTROLS // Техмаркет URL: <https://www.techmarcket.ru/krany-sharovye/krany-sharovye-s-elektroprivodom/kran-sharovyy-also-lstalnoystandartnoprohodnoyflancevyys-elektroprivodom-bernard-16-40-bar/> (дата обращения: 08.05.2023).

17. Wasilczuk M. Friction and Lubrication of Large Tilting-Pad Thrust Bearings. – Lubricants. – 2015. – Т. 3. – С. 164-180.

18. Knauder C., Allmaier H., Sander D.E., Salhofer S., Reich F.M., Sams T. Analysis of the Journal Bearing Friction Losses in a Heavy-Duty Diesel Engine. – Lubricants. – 2015. – Т. 3. – С. 142-154.

19. Патент № 2599414 C2 Российская Федерация, МПК F02C 9/26. Способ и устройство для мониторинга системы приведения в действие на основе сервоклапанов: № 2013144739/06: заявл. 24.02.2012: опубл. 10.10.2016 / Н. М. П. Гейт, Ф. Годель, Б. Понтальлье.

20. 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.

**Шутин Денис Владимирович**

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

**Литовченко Максим Геннадьевич**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел  
Стажер-исследователь НОЦ «Интеллектуальные  
технологии мониторинга и диагностики  
энергогенерирующего оборудования»  
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 29  
E-mail: yamaks123@bk.ru

M.G. LTOVCHENKO, D.V. SHUTIN

## SOFTWARE AND HARDWARE SYSTEM OF SEMI-ACTIVE LUBRICATION TRIBOTRONIC FLUID FRICTION SUPPORTS

**Abstract.** Active lubrication of hydrostatodynamic bearings makes it possible to influence the dynamic and tribological parameters of the rotor system by separately regulating the pressure of lubricant supply to the bearing. For the purpose of conducting experimental studies of such systems, servo valves with a direct current electric drive were used in the experimental installation. Feedback in hydraulic circuits is implemented using pressure sensors. The system can also be interfaced with shaft vibration sensors to monitor its position in the bearing. For closed-loop control of lubricant pressure and rotor position, a hardware-software controller was developed and implemented to control servo valves based on a PID controller. The controller receives signals from a higher-level control device specifying the required values of output parameters via several parallel channels. The developed software and hardware controls set the control mechanism of the servo valves to positions that provide the specified values of the output parameters. The results demonstrate the ability of the developed system to perform regulatory functions with acceptable speed and transient quality, including the absence of overshoot in response to a changing setpoint value.

**Keywords:** servo valves, control systems, rotary systems, active bearings, controllers.

## BIBLIOGRAPHY

1. Savin L.A. Hybrid fluid friction bearings / Savin L.A., Marakhin N.A., Nguyen Thai Ha, Liu Yifan, Kazakov Yu.N. // Fundamental and applied problems of engineering and technology. – 2023. - №. 6(362). pp. 108-116.
2. Fetisov A.S. Experimental assessment of the characteristics of tribotronic rotor supports / Fetisov A.S., Rodichev A.Yu., Litovchenko M.G., Shutin D.V. // Fundamental and applied problems of engineering and technology. – 2024. - №. 1(363). pp. 52-60.
3. Shutin D.V. Control of servo valves for the implementation of active lubrication of hydrostatodynamic bearings / Shutin D.V., Nastepanin K.K. // Fundamental and applied problems of engineering and technology. – 2023. - №. 3(359). pp. 137-144.
4. Servo valve with electric drive AQUABAST 12V // Bastion URL: <https://bast.ru/products/aquabast/> (access date: 05/08/2023).
5. Wireless servo valve with electric drive ArmaControl -5 // Armastock URL: <https://armastock.ru/besprovodnaya-wi-fi-sistema-zashchity-ot-protechki-vody-armacontrol-5-s-odnim-wifi-sharovym-kranom> (date of access: 05/08/2023).
6. Servo valve with electric drive AR24 // SPUTNIK URL: <https://privod-sputnik.ru/wp-content/uploads/2023/04/kran-s-elektroprivodom-SPUTNIK-AR24-230-K2-DN-15-25.pdf> (access date: 05/08/2023).
7. Servo valve with electric drive Rotork, PN 16-40 // Techmarket URL: <https://www.techmarcket.ru/krany-sharovye/krany-sharovye-s-elektroprivodom/kran-sharovyy-TEMPERstalnoystandartnoprohodnoyflancevyys->

elektroprivodom-RotorkPN-16- 40-bar/ (date of access: 05/08/2023).

8. 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.

9. Patent No. 2717197 C2 Russian Federation, IPC F01P 1/08, F01P 7/02, F02B 37/18. Turbocharger system and method (options) for cooling the pressure regulator in the turbocharger system: No. 2016104236: application. 02/10/2016: publ. 03/18/2020 / Sh. Sh. D. Yamada, T. D. Gardner, K. D. Tiernen [et al.]; Petitioner Ford Global Technologies, LLC.

10. Utility model patent No. 170055 U1 Russian Federation, IPC G01P 3/00. Device for simultaneous measurement of turbocharger shaft rotation speed and air vacuum in the turbocharger diffuser: No. 2016139430: appl. 10.10.2016: publ. 04/12/2017 / Yu. I. Belyaev, V. A. Perminov, T. V. Trepacheva; applicant Joint Stock Company "Scientific Research and Design-Technological Institute of Rolling Stock" (JSC "VNIKTI").

11. Copyright certificate No. 188551 A1 USSR, IPC G01R 23/02, H02J 3/24, G01R 29/18. Method for determining the non-synchronous motion and slip sign of a turbogenerator or part of turbogenerators in a power system: No. 928317/24-7: application. 09.11.1964: publ. 01.11.1966 / E. I. Zagoskin.

12. Titko, A. I. Distribution of electromagnetic vibration-exciting forces of the stator of a powerful turbogenerator / A. I. Titko, A. N. Melnik // Praci Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine. – 2014. – No. 37. – P. 39-44.

13. Servo valve with electric drive ALSO GZ // Techmarket URL: <https://www.techmarcet.ru/krany-sharovye/krany-sharovye-s-elektroprivodom/kran-sharovyy-ALSO-stalnoy-standart-s-elektroprivodom-gz-pn-16-40-bar/> (date of access: 05/08/2023).

14. Servo valve with electric drive NAVAL Auma // Techmarket URL: <https://www.techmarcet.ru/krany-sharovye/krany-sharovye-s-elektroprivodom/kran-sharovyy-NAVALstalnoystandartnoprohodnoyflancevyys-elektroprivodom-AumaPN-16-40-bar/> (date of access: 05/08/2023).

15. Servo valve with electric drive BELIMO 16 // Techmarket URL: <https://www.techmarcet.ru/krany-sharovye/krany-sharovye-s-elektroprivodom/kran-sharovyy-BELIMOlatunnyystandartnoprohodnoymuftovyys-elektroprivodomPN-16-barshveycariya/> (access date: 05/08/2023).

16. Servo valve with electric drive ALSO, BERNARD CONTROLS // Techmarket URL: <https://www.techmarcet.ru/krany-sharovye/krany-sharovye-s-elektroprivodom/kran-sharovyy-also-lstalnoystandartnoprohodnoyflancevyys-elektroprivodom-bernard-16-40-bar/> (date of access: 05/08/2023).

17. Wasilczuk M. Friction and Lubrication of Large Tilting-Pad Thrust Bearings. - Lubricants. – 2015. – T. 3. – P. 164-180.

18. Knauder C., Allmaier H., Sander D.E., Salhofer S., Reich F.M., Sams T. Analysis of the Journal Bearing Friction Losses in a Heavy-Duty Diesel Engine. - Lubricants. – 2015. – T. 3. – P. 142-154.

19. Patent No. 2599414 C2 Russian Federation, IPC F02C 9/26. Method and device for monitoring an actuation system based on servo valves: No. 2013144739/06: application. 02/24/2012: publ. 10.10.2016 / N. M. P. Gate, F. Godel, B. Pontallier.

20. 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.

**Shutin Denis Vladimirovich**

Orel State University,  
Associate Professor of the Department Mechatronics,  
Mechanics and Robotics  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: rover.ru@gmail.com

**Litovchenko Maksim Gennadievich**

Orel State University  
Intern-researcher of SEC "Intelligent technologies for  
monitoring and diagnostics of power generating  
equipment"  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: yamaks123@bk.ru

© М.Г. Литовченко, Д.В. Шутин, 2024

М.Э. БОНДАРЕНКО, И.В. РОДИЧЕВА, А.Д. СЕРЕБРЕННИКОВ, К.В. СМИРНОВА

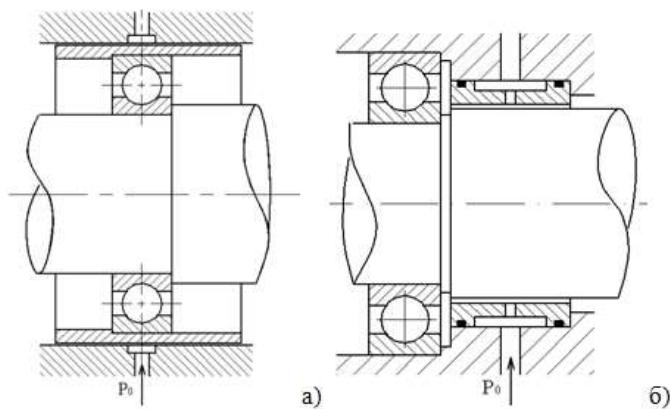
## ВЛИЯНИЕ АКТИВНЫХ КОМБИНИРОВАННЫХ ПОДШИПНИКОВ НА ДИНАМИКУ МНОГОМАССОВОГО РОТОРА

**Аннотация.** В статье рассматриваются результаты изучения динамического поведения многомассового асимметричного жесткого ротора в активных комбинированных подшипниках (АКП), включающих подшипник качения, многолепестковый газодинамический подшипник и систему электромагнитных и пьезоэлектрических приводов. Механизм работы электромагнитных и пьезоэлектрических приводов описывается в имитационной модели на основе уравнений, описывающих электромагнетизм и пьезоэффект. Результаты математического моделирования представлены в виде диаграмм Кэмпбелла, амплитудно-частотных характеристик системы ротор-подшипник и жесткости АКП.

**Ключевые слова:** ротор, комбинированный подшипник, жесткость, собственная частота, активное управление.

### Введение

Надежность функционирования вращающегося механизма в значительной степени определяется его роторно-опорными узлами. При повышенных требованиях к частоте вращения, температуре и максимальному уровню вибрации подшипники качения и газодинамические подшипники скольжения не могут предоставить соответствующие эксплуатационные характеристики на всем диапазоне рабочих условий. АКП состоит из подшипника качения и многолепесткового газодинамического подшипника, что делает его в состоянии избежать недостатков и сохранить преимущества каждого из указанных типов подшипника. Интерес к комбинированным подшипникам появился в 1960-1970 годах [1-3]. В 1980-ых НАСА запустила несколько научно-исследовательских программ по исследованию комбинированных подшипников для криогенных турбонасосных агрегатов [4-6]. Эти исследования продемонстрировали преимущества комбинированных подшипников и возможности их применения в турбомашиностроении. Существуют две принципиально различные конфигурации комбинированных подшипников. Это конфигурация разделения нагрузки (РН) и разделения скорости (РС) [3]. На рисунке 1а показана последняя концепция комбинированного подшипника с разделением скоростей. В представленной схеме гидростатодинамический подшипник (ГСДП) смонтирован на наружном кольце подшипника качения. Такая конфигурация позволяет уменьшить скорость вращения подшипника качения [7, 8].



**Рисунок 1 – Комбинированные подшипники:**  
а) с разделением скоростей, б) с разделением нагрузки

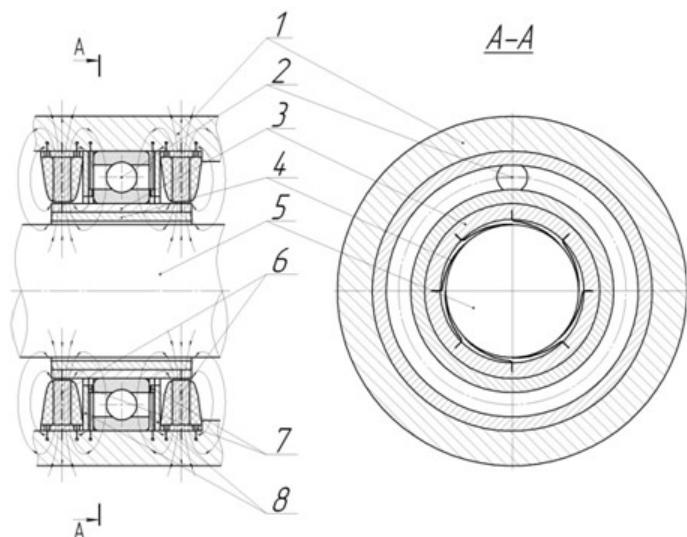
Вал вращается в подшипнике качения во время пуска и режима остановки. ГСДП включается в основном режиме работы, так как при росте скорости вращения повышается грузоподъемность ГСДП, и подшипник качения частично выключается. Таким образом, рабочий ресурс подшипника качения увеличивается из-за меньшего значения быстродействия, которое является произведением скорости вращения и диаметра вала [9-11].

На рисунке 16 представлена концепция комбинированного подшипника с разделением нагрузки. В представленной конструкции подшипник качения и подшипник скольжения установлены параллельно. Хотя вал постоянно вращается в подшипнике качения, срок службы подшипника качения увеличивается за счет меньших нагрузок на высоких скоростях вращения. Во время пуска и остановки основную нагрузку воспринимает подшипник качения. На основном рабочем режиме основную нагрузку начинает воспринимать подшипник скольжения за счет возникновения гидродинамической реакции в слое жидкости. Таким образом, нагрузка, действующая на подшипник качения снижается и ресурс опорного узла возрастает.

### **Основная часть**

Разработка интеллектуальных систем управления для вращающихся машин является очень трудоемким с точки зрения сочетания алгоритмов, математики, программного обеспечения и практической реализации. Потенциально интеллектуальные системы контроля позволяют принимать рациональные решения управления при отсутствии информации или в условиях неопределенности с целью обеспечения работоспособности машины. Контролируемые параметры, которые обеспечивают необходимые динамические и интегральные характеристики в АКП являются: зазор между подшипником и поверхностью вала; давление смазочного материала на входе или в рабочей зоне; вязкость смазочного материала; расход смазочного материала; перемещение и скорость центра вала; жесткость и демпфирование подшипников, уплотнений и амортизаторов. Значения приведенных параметров могут регулироваться с помощью пневматических, гидравлических и электромеханических приводов.

Авторами предлагается конструкция АКП, изображенного на рисунке 2. АКП состоит из корпуса 1, в котором установлены подшипник качения 2, в подшипнике качения 2 закреплена втулка 3 с металлическими пластинами 4, которые служат элементами центрирования вала 5. По окружности в корпусе 1 закреплены электромагнитные катушки 6. Для стопорения внутреннего кольца на основном режиме работы комбинированной опоры установлены пьезоэлементы 7, закрепленные на кольце 8.



*Рисунок 2 – Активный комбинированный подшипник*

Устройство работает следующим образом: в начальный момент времени передача нагрузки с вала 5 на корпус 1 осуществляется через металлические пластины 4 и тела качения подшипника качения 2. По мере возрастания скорости вращения вала 5 на электромагнитные катушки 6 и пьезоэлементы 7 подается напряжение. Возникает электромагнитное поле, которое отгибает пластины 4 от поверхности вала 5, при этом между пластинами 4 и валом 5 образуется воздушный зазор в котором возникает газодинамическая сила, которая центрирует вал и воспринимает внешнюю нагрузку. Внутреннее кольцо подшипника качения 2 стопорится пьезоэлементами 7 с торцевых сторон, таким образом подшипник качения 2 выключается из работы. При остановке происходят обратные процессы. При этом повышается

устойчивость вращения ротора за счет повышенного демпфирования со стороны упругих металлических пластин.

Представим модель лепестка в виде цилиндрической оболочки. Рассмотрим цилиндрическую оболочку в системе координат  $z, \theta$ . Деформацию лепестка под совместным действием электромагнитных и газодинамических сил определяем путем решения системы дифференциальных уравнений для цилиндрической оболочки из уравнений общей теории оболочек [6].

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{1-v}{2r^2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + \frac{1+v}{2r} \cdot \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z \partial \theta} + \frac{v}{r} \cdot \frac{\partial w}{\partial z} = 0; \\ \frac{1+v}{2r} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z \partial \theta} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial \theta^2} + \frac{1-v}{2} \cdot \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} + \frac{1-v}{r^2} \cdot \frac{\partial w}{\partial \theta} = -\frac{1-v^2}{E\delta} \left[ p(\theta, z) + \frac{F_{em}}{A} \right]; \\ v \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial \theta} + \frac{w}{r} + \frac{k_1}{r} \left[ r^3 \frac{\partial^4 w}{\partial z^4} + 2r \frac{\partial^4 w}{\partial z^2 \partial \theta^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial^4 w}{\partial \theta^4} \right] = -\frac{1-v^2}{E\delta} \left[ p(\theta, z) + \frac{F_{em}}{A} \right]. \end{cases}$$

где  $\vartheta, u, w$  - перемещения лепестка;

$r$  - радиус кривизны лепестка;

$\delta$  - толщина лепестка;

$p(\vartheta, z)$  - газодинамическая сила;

$F_{em}$  - электромагнитная сила;

$A$  - площадь поверхности лепестка.

Определение газодинамической реакции со стороны одного лепестка базируется на решении уравнения Рейнольдса, записанного для случая стационарного двумерного турбулентного течения вязкого сжимаемого смазочного материала. Уравнение Рейнольдса с помощью качественных оценок выводится из системы Навье-Стокса в предположении малости зазора между трущимися поверхностями, по сравнению с остальными размерами [12, 13]. Использование уравнения Рейнольдса является в теории газовой смазки общепринятым, и результаты, полученные с использованием этой математической модели, хорошо согласуются с экспериментом. При движении воздушной смазки в зазоре влияние инерционных сил также мало по сравнению с силами давления и вязкими силами. Принимая  $x = r\cdot\theta$ ,  $\partial x = r\partial\theta$ , отобразим уравнение Рейнольдса в цилиндрических координатах:

$$\frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{\rho h^3}{\mu K_\theta} \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\rho h^3}{\mu K_z} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6 \frac{\partial(\rho \cdot U \cdot h)}{\partial \theta}$$

Коэффициенты турбулентности  $K_\theta$  и  $K_z$  учитывают влияние дополнительной турбулентной вязкости. Коэффициенты турбулентности определяем по соотношениям [14, 15].

$$K_x = 1 + 0,044 \cdot (k^* \cdot \text{Re})^{0,725};$$

$$K_z = 1 + 0,0247 \cdot (k^* \cdot \text{Re})^{0,65},$$

где  $k^*$  - коэффициент Кармана,  $k^* \approx 0.2..0.4$ , причем малые значения коэффициента Кармана соответствуют малым радиальным зазорам  $h = 10..100$  мкм. Коэффициент Кармана часто рассчитывают по эмпирической зависимости  $k^* = 0,125 \cdot \text{Re}^{0,07}$ .

Функция радиального зазора  $h$  определяется как разница между точками поверхности вала и отжатого упругого лепестка

$$h(n) = \frac{h_0 - w}{N} (N - n) + w - Y_0 \cos(\varphi) - X_0 \sin(\varphi),$$

где  $h_0$  - радиальный зазор между валом и местом закрепления лепестка;

$w$  - расположение лепестка;

$N$  - число разбиений лепестка на участки;  $n = 0..N$  - номер участка лепестка;

$X_0$  - смещение вала по оси  $x$ ;

$Y_0$  - смещение вала по оси  $y$ ;

$\varphi$  - угол относительного положения вала в зазоре подшипника.

Определение поля давлений  $p(\theta, z)$  в конкретный момент времени представляет собой краевую задачу решения уравнения Рейнольдса – нелинейного уравнения в частных производных эллиптического типа с переменными коэффициентами – со следующими граничными условиями:

– заданное давление слива  $p_a$  (на торцах подшипника):

$$p(r\theta, 0) = p_a; \quad p(r\theta, L) = p_a$$

– опорная поверхность ротора полностью охвачена смазочным слоем (гипотеза Зоммерфельда):

$$p(\theta, z) = p(2\pi, z); \quad \frac{\partial p}{r\partial\theta}(\theta, z) = \frac{\partial p}{r\partial\theta}(2\pi, z).$$

Обоснованность данного подхода показана в [16, 17].

Влияние смазочного слоя может быть учтено включением в расчетную схему с помощью следующих составляющих: гидродинамическая (подъемная) сила  $R$ , обусловленная вязкостью смазочного материала и сила трения  $F_{mp}$

Проекции гидродинамической силы на оси подвижной системы координат  $IO_1J$ , которая привязана к конкретному лепестку подшипника, могут быть найдены из соответствующих геометрических соображений по формулам:

$$R_j = - \int_0^{L/2\pi} \int_0^p \sin(\theta - \varphi) \cdot rd\theta dz$$

$$R_i = - \int_0^{L/2\pi} \int_0^p \cos(\theta - \varphi) \cdot rd\theta dz$$

Несущая способность (грузоподъемность)  $W$  и направление ее действия (угол  $\varphi_W$ ) определяются соотношениями:

$$W = \sqrt{R_j^2 + R_i^2},$$

$$\varphi_W = \operatorname{arctg}(R_x / R_y)$$

Суммарная несущая способность  $W$  газодинамического подшипника находится путем векторного суммирования реакций в каждом лепестке.

Динамические характеристики газодинамического подшипника определяются следующими соотношениями:

$$R_x^f = -K_{xx}\Delta x - K_{yx}\Delta y - B_{xx}\Delta \dot{x} - B_{yx}\Delta \dot{y}, \quad R_y^f = -K_{xy}\Delta x - K_{yy}\Delta y - B_{xy}\Delta \dot{x} - B_{yy}\Delta \dot{y}$$

Коэффициенты  $K_{xx}, K_{xy}, \dots, B_{yx}, B_{yy}$  являются частными производными, рассчитанными в положении равновесия:

$$K_{mn} = \left. \frac{\partial R_m}{\partial n} \right|_0, \quad B_{mn} = \left. \frac{\partial R_m}{\partial \dot{n}} \right|_0, \quad m, n = x, y$$

Классическая модель подшипника качения основывается на теории Герца. Всесторонний анализ подшипников качения можно найти в [19, 20]. Элементы качения деформируются в направлении вектора радиальной нагрузки на величину  $\delta$ . Характеристика смещения под действием силы подшипника качения в точке контакта может быть выражена с помощью  $K'$ , который является общей жесткостью внешних и внутренних дорожек качения.

$$R^r = K' \delta^{3/2}, \quad K' = \frac{K'_i K'_o}{K'_i + K'_o}$$

Квазистатическая жесткость ПК выражается через динамические коэффициенты в зависимости от смещения центра цапфы ротора:

$$R_x = K_x X, \quad R_y = K_y Y, \quad \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \end{Bmatrix} = \frac{2}{3} (K)^{2/3} \left[ F_\Sigma \begin{Bmatrix} \cos \gamma \\ \sin \gamma \end{Bmatrix} \right]^{1/3}$$

Эквивалентная нагрузка, действующая на подшипник качения суммируется из приложенной нагрузки, веса ротора и реакции смазочного слоя подшипника скольжения, действующей под углом бета:

$$F_\Sigma = F_r + mg \cos \gamma - R^f \cos(\gamma - \beta).$$

Электромагнитная сила, действующая на лепесток, находится согласно [21, 22].

$$F_{em} = \frac{U}{H} \frac{k_{Cu} a^2 l_m}{128 \rho \mu_0^2} \left( \frac{D}{2} - \frac{d}{2} - t \right)^2 \left( \frac{\pi d}{8} - t \right)^2, \quad (1)$$

где  $U$  - напряжение, подаваемое на обмотки катушек;  
 $H$  – зазор между обмотками электромагнита и лепестком;  
 $k_{Cu}$  - коэффициент заполнения площади паза  $A$  медью (ориентировочно  $k_{Cu}=0,3 \dots 0,5$ );  
 $a$  - коэффициент числа полюсов,  $a=0,924$  при количестве полюсов  $p = 8$  [23];  
 $l_m$  - средняя длина проводника катушки;  $\rho \approx 0.018 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$  – удельное сопротивление меди – материала, из которого выполнены провода обмотки;  $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$  - магнитная постоянная;  
 $D$  – внешний диаметр обмоток катушек;  
 $d$  – внутренний диаметр обмоток катушек;  
 $t$  – ширина полюса.

Пользуясь выражением (1), можно определить силу, действующую на лепесток газодинамического подшипника со стороны электромагнита, что позволяет рассчитать его дополнительную деформацию, обусловленную воздействием электромагнитных сил, которые в свою очередь возможно регулировать за счет изменения прикладываемого к катушке напряжения постоянного тока и тем самым управлять перемещением лепестка в зазоре газодинамической составляющей комбинированной опоры.

Динамическое поведение ротора в АКП может быть изучено с помощью математической модели многомассового жесткого асимметричного ротора. Схема, иллюстрирующая модель, показана на рисунке 3.

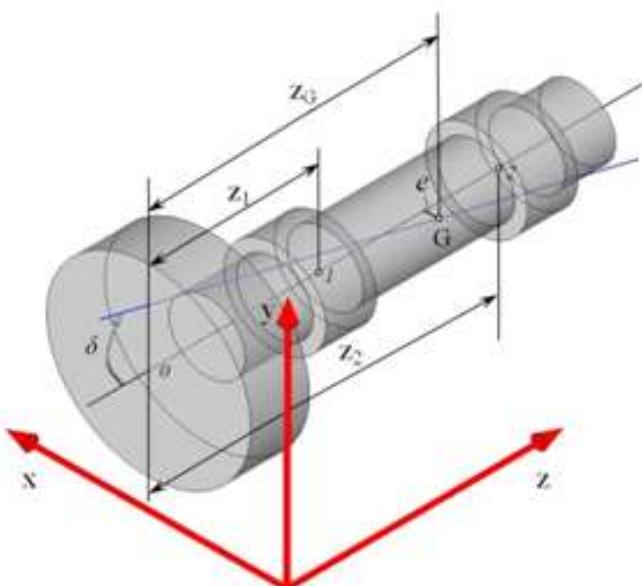


Рисунок 3 – Модель многомассового асимметричного ротора

Уравнения движения твердого асимметричного ротора были получены с использованием уравнений Лагранжа [24].

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = \sum W_i$$

где  $q_i$  - обобщенная координата,

$W_i$  - обобщенная сила в  $i$ -ом перемещении.

Согласно теореме Кенига кинетическая энергия ротора:

$$T = \frac{1}{2} m \left( \dot{X}_G^2 + \dot{Y}_G^2 \right) + \frac{1}{2} I_z \omega_z^2 + \frac{1}{2} I_z \left( \omega_x^2 + \omega_y^2 \right), \quad (2)$$

где  $m$  – масса ротора,

$\omega_z, \omega_x, \omega_y$  - проекции вектора угловой скорости на основную ось ротора,

$I_X, I_Y, I_Z$  – основные моменты инерции.

Обобщенные силы, действующие на ротор:

$$\begin{aligned}\Sigma W_1 &= \frac{1}{Z_2 - Z_1} \sum_k M_k + \frac{1}{Z_2 - Z_1} \sum_m F_m (Z_2 - Z_m^F) \\ \Sigma W_2 &= -\frac{1}{Z_2 - Z_1} \sum_k M_k + \frac{1}{Z_2 - Z_1} \sum_m F_m (Z_m^F - Z_1)\end{aligned}$$

Преобразование уравнений (2) дает уравнения, описывающие динамику многомассового жесткого асимметричного ротора:

$$\begin{aligned}m\ddot{X}_1 &= m \frac{I_z}{I} \omega \lambda_1 (\dot{Y}_2 - \dot{Y}_1) + m e \omega^2 \cos \omega t - m \frac{I - I_z}{I} \lambda^2 \lambda_1 \delta \omega^2 \cos \omega t + \\ &+ \Sigma W_1 \left( 1 + m \frac{\lambda^2 \lambda_1^2}{I} \right) + \Sigma W_2 \left( 1 - m \frac{\lambda^2 \lambda_1 \lambda_2}{I} \right); \\ m\ddot{X}_2 &= -m \frac{I_z}{I} \omega \lambda_2 (\dot{Y}_2 - \dot{Y}_1) + m e \omega^2 \cos \omega t + m \frac{I - I_z}{I} \lambda^2 \lambda_2 \delta \omega^2 \cos \omega t + \\ &+ \Sigma W_1 \left( 1 - m \frac{\lambda^2 \lambda_1 \lambda_2}{I} \right) + \Sigma W_2 \left( 1 + m \frac{\lambda^2 \lambda_2^2}{I} \right); \\ m\ddot{Y}_1 &= m \frac{I_z}{I} \omega \lambda_1 (\dot{X}_2 - \dot{X}_1) + m e \omega^2 \sin \omega t + m \frac{I - I_z}{I} \lambda^2 \lambda_1 \delta \omega^2 \sin \omega t + \\ &+ \Sigma W_3 \left( 1 + m \frac{\lambda^2 \lambda_1^2}{I} \right) + \Sigma W_4 \left( 1 - m \frac{\lambda^2 \lambda_1 \lambda_2}{I} \right); \\ m\ddot{Y}_2 &= -m \frac{I_z}{I} \omega \lambda_2 (\dot{X}_2 - \dot{X}_1) + m e \omega^2 \sin \omega t + m \frac{I - I_z}{I} \lambda^2 \lambda_2 \delta \omega^2 \sin \omega t + \\ &+ \Sigma W_3 \left( 1 - m \frac{\lambda^2 \lambda_1 \lambda_2}{I} \right) + \Sigma W_4 \left( 1 + m \frac{\lambda^2 \lambda_2^2}{I} \right).\end{aligned}$$

Здесь:

$$\lambda_1 = \frac{Z_G - Z_1}{Z_2 - Z_1}; \quad \lambda_2 = 1 - \frac{Z_G - Z_1}{Z_2 - Z_1}; \quad \lambda = Z_2 - Z_1.$$

Вычислительный эксперимент проводился с ротором смонтированным в турбонасосе с частотой вращения 83000 об/мин. В вычислениях использовались следующие параметры: модуль Юнга  $E=2 \cdot 10^{11}$  Па, коэффициент Пуассона  $\mu=0,3$ ; плотность  $\rho=7850$  кг/м<sup>3</sup>; полная масса ротора 4,3 кг; момент инерции ротора составляет  $4,88 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>2</sup>; скорость вращения ротора – 83000 об/мин.

Активное управление позволяет изменять жесткость и демпфирующие свойства АКП, которое помогает изменить собственные частоты системы ротора. Рисунок 4 показывает диаграмму Кэмпбелла для роторной системы с АКП. Точка 1 для всех значений собственных частот соответствует первому возможному состоянию роторной системы (при включенных электромагнитах жесткость опорного узла  $3.7 \cdot 10^{10}$  Н/м), точка 2 соответствует второму возможному состоянию (при выключенных электромагнитах жесткость опорного узла  $2.2 \cdot 10^8$  Н/м). При подходе к критической частоте, соответствующей первому состоянию роторной системы, меняется значение напряжения на электромагнитах, жесткость опорного узла уменьшается, роторная система переходит во второе состояние, которому соответствует значение критической частоты меньше текущей рабочей частоты ротора. При выходе на рабочую частоту вращения управляющие параметры можно подобрать таким образом, чтобы обеспечить минимальную виброактивность роторной системы.

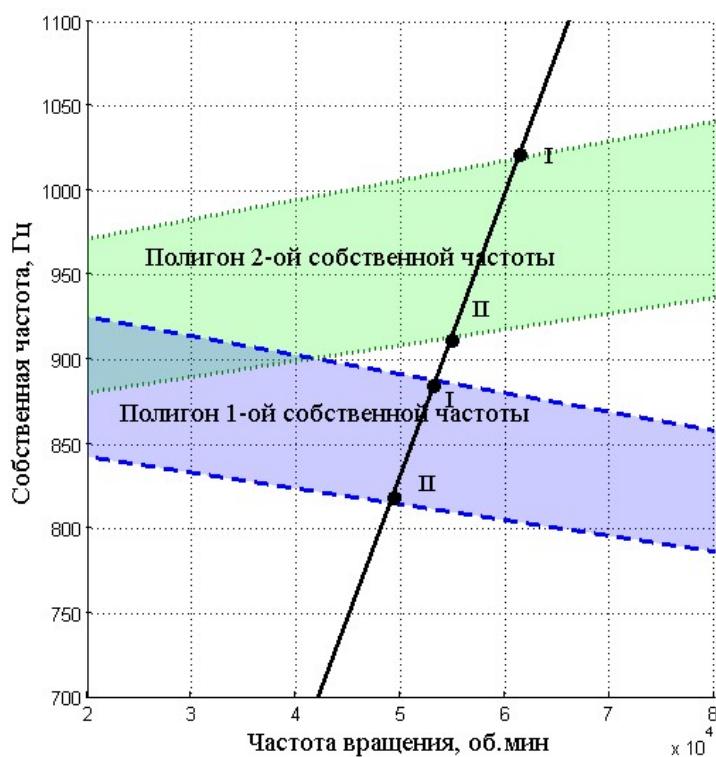


Рисунок 4 – Диаграмма Кэмпбелла для ротора в активных комбинированных подшипниках

На рисунке 5 показан процесс переключения между двумя различными уровнями жесткости АКП и его влияние на значения амплитуды колебаний ротора. Ротор имеет две различные собственные частоты для каждого значения жесткости АКП. Данный принцип позволяет сформулировать задачу управления, как преодоление резонансных частот с минимальными значениями амплитуды колебаний.

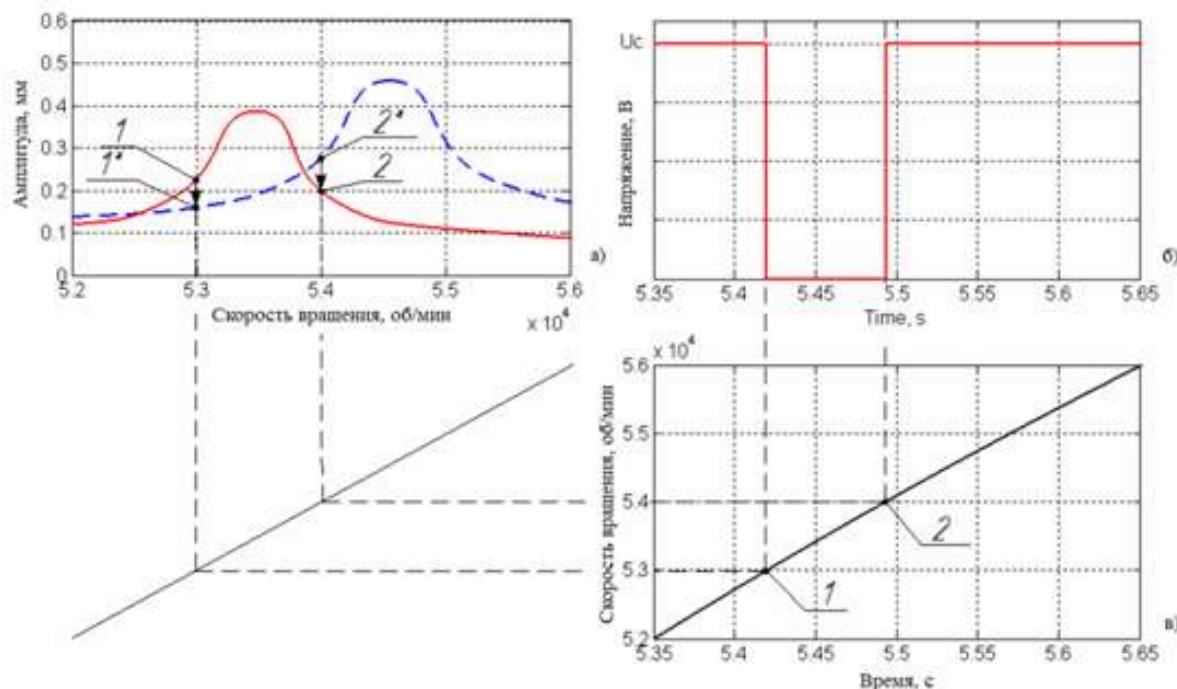


Рисунок 5 - Связь между динамическими параметрами системы ротора и управляющего напряжения, подаваемого на электромагнитные актуаторы

Следовательно, процесс управления будет следующим. Во время разгона ротора при подходе к первой критической частоте АКП, соответствующей первому уровню жесткости, происходит переключение подшипника на второй уровень жесткости, где значение амплитуды

колебаний находится в диапазоне между первой и второй критической скоростью второго уровня жесткости. При приближении ко второй критической частоте второго уровня жесткости, подшипник переключается на первый уровень жесткости, поэтому значение амплитуды колебаний становится в диапазоне после второй критической частоты первого уровня жесткости. Представленный алгоритм исключает возможность увеличения амплитуды колебаний при прохождении критических частот. Алгоритм может быть продлен для прохождения следующих критических частот до номинальной частоты вращения.

Алгоритм работы электромагнитных актуаторов (рисунок 5,б) может быть разработан из имеющихся значений критических частот (рисунок 5,а) и разгонной характеристики роторной машины (рисунок 5,в).

### Заключение

Таким образом, теоретическая модель многомассового жесткого ротора на АКП позволяет определить частотную характеристику ротора, выявить резонансные зоны с учетом переменной жесткости подшипников, определить взаимное влияние силовых факторов комбинации подшипников и необходимое время включения и выключения электромагнитных приводов для уменьшения значения вибрации при прохождении резонансных частот.

## 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. Konzanek, 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

**Серебренников 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: silver5793@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: irina.rodicheva.rodicheva@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

M.E. BONDARENKO, I.V. RODICHEVA, A.D. SEREBRENNIKOV, K.V. SMIRNOVA

## INFLUENCE OF ACTIVE COMBINED BEARINGS ON THE DYNAMICS OF A MULTIMASS ROTOR

**Abstract.** The paper focuses on the results of studying the dynamic behavior of a multi-mass asymmetric rigid rotor on the active hybrid bearings (AHB) including a rolling bearing, a gas-dynamic multi-foil bearing and a system of the electromagnetic and piezo actuators. The mechanisms of electromagnetic and piezo actuators operation are described by a simulation model based on the equations describing electromagnetism and piezo effect. The results of mathematical modeling in the form of Campbell diagrams, the frequency response of the rotor-bearing system, the stiffness of the AHB.

**Keywords:** rotor, hybrid bearings, stiffness, natural frequencies, active control.

## 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. 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.
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

**Rodicheva Irina Vladimirovna**

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

**Serebrennikov Artem Dmitrievich**

Orel State University  
Student of the Department Mechatronics, Mechanics and  
Robotics  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: silver57@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

ЛЮ ИФАНЬ

## СТАТИЧЕСКАЯ ЖЕСТКОСТЬ КОНИЧЕСКИХ КОЛЬЦЕВЫХ ДЕМПФЕРОВ ПОДШИПНИКОВ ЖИДКОСТНОГО ТРЕНИЯ

**Аннотация.** Рассмотрен принцип работы и конструкция конического кольцевого демпфера радиально-осевых подшипников жидкостного трения. Получены выражения для расчета статической жесткости демпфера новой конструкции с листовыми элементами. Создана опытная установка и проведены экспериментальные исследования механических характеристик конического демпфера. Представлены результаты сравнительного анализа экспериментальных и расчетных данных.

**Ключевые слова:** упруго-демпферная опора ротора, конический кольцевой демпфер сухого трения, механические характеристики, жесткость, радиально-упорный подшипник жидкостного трения, моделирование, экспериментальная установка.

### Введение

Балансировка роторов не позволяет решить проблему динамической устойчивости и устранить негативное влияние источников вибраций, т.к. в процессе функционирования возникают гидромеханические и тепловые дисбалансы в рабочих колесах и проточных трактах. В настоящее время считается, что вибрационные эффекты можно успешно устранить за счет демпфирования в опорах роторов, которые являются наиболее напряженными элементами, осуществляющими связь вращающихся частей с корпусом. В качестве демпфирующих устройств используют элементы сухого и жидкостного трения, а также их комбинации [1]. Проблема эффективного демпфирования является наиболее важной для высокоскоростных роторных агрегатов двигательных установок и технологических агрегатов электро- и турбоприводом, рабочие частоты которых часто находятся в критической области, что предполагает переход критических частот на этапах разгона и останова. Упруго-демпферные опоры (УДО) выполняют две основные функции: 1) снижают жесткость, что приводит к изменению динамической упругости системы и уменьшению значений критических частот, что дает возможность вывести зоны резонансных частот из рабочих режимов; 2) поглощают энергию колебаний, превращая ее в тепло, что не позволяет развиваться колебаниям с большими амплитудами и напряжениям в несущих элементах. Демпфирующие устройства опор роторов должны иметь ресурс не менее времени эксплуатации всей машины, минимальные массогабариты, надежность и эффективность во всем диапазоне частот вращения, позволяли размещение и включение в силовую схему машины. Проблематика проектирования УДО связана с выбором оптимальной жесткости и демпфирования для устранения резонансных режимов, обеспечения энергетической эффективности, снижения уровня вибраций до значений менее допустимых зазоров между рабочими колесами, уплотнениями и корпусом машин.

Подробный анализ конструкций и методов расчета УДО с жидкостным и сухим трением изложен в работе [2]. Известны технические решения упруго-демпферных опор [3-4], содержащие подшипники качения с установленным в коаксиальное пространство между наружными кольцами подшипников и внутренними поверхностями корпусов пакетами кольцевых многослойных гофрированных пластин. Данные опоры обладают окружной изотропией упругих и демпфирующих свойств, обеспечивающей эффективность опоры в снижении вибрации ротора и действующих радиальных динамических нагрузок, а также обеспечивает центрирование ротора в корпусе при сборке с установкой пакета пластин с натягом по сопрягаемым поверхностям. В работе [5] описана управляемая упруго-демпферная опора, содержащая конический подшипник, упругое демпфирующее кольцо, пьезоэлектрический привод и контроллер. Конструкция данной УДО проста, позволяет выдерживать большие нагрузки, а также сохранять высокую эксплуатационную устойчивость, особенно при приближении и прохождении зоны первой критической скорости. В работе [6] представлена система снижения вибрации конического подшипника типа демпфирующего

кольца, соединенная многослойными демпфирующими пластинами, которая решила техническую проблему нерегулируемой радиальной и осевой жесткости и демпфирования опоры. В работе [7] описана упругодемпферная опора ротора с активным управлением, которая позволяет снизить амплитуды вибраций при прохождении критических частот. В работе [8] предложена модифицированная конструкция роторной системы, позволившая снизить амплитуды колебаний при значениях скоростей вращения, близких к критическим значениям. В работе [9] показано исследование характеристик вертикального ротора с гидродинамическими демпферами, применяемыми в узлах с вертикальными цилиндрическими подшипниками. Такая конфигурация масляных пленок позволяет компенсировать потерю устойчивости в цилиндрическом подшипнике скольжения на высоких оборотах ротора. В работе [10] исследовано влияние геометрических соотношений УДО и механических параметров на осевые силы в магнитоэлектрическом демпфере, которые могут в значительной степени влиять на протекающие в нем электромагнитные процессы. В работе [11] предложили новый тип магнитореологических демпферов, которые сочетают в себе упругую опору и сжимаемую масляную пленку. Он может не только изменять размер силы масляной пленки, но и изменять направление силы масляной пленки, что приводит к уменьшению диапазона нелинейных колебаний роторной системы и уменьшению амплитуд вибраций роторной системы. В работе [12] исследовалось применение магнитореологических жидкостей в качестве рабочего тела жидкостного демпфера сжатия. Магнитореологическая жидкость представлена как билинейный материал. Результаты показали возросшую динамическую стабильность гибкого ротора на магнитореологических демпферах. В работе [13] представлены результаты исследований активных магнитных демпферов, было показано, что пиковое радиальное отклонение снижается в среднем на 79% при первой критической скорости вала. В работе [14] для ротора турбогенератора был разработан магнитореологический демпфер, который показал значительное снижение крутильных колебаний ротора. В работе [15] разработали регулируемый фрикционный демпфер массы (FTMD), который позволил значительно уменьшить структурные резонансные пиковые амплитуды в исследуемой частотной области возбуждения. В работе [16] разработан комбинированный демпфер с опорой на вспомогательных подшипниках (Auxiliary bearings, AB) и демпфером из сжимающей пленки (squeeze film damper, SFD) для подавления переходных колебаний ротора при падении ротора, поддерживаемого магнитными подшипниками. В работе [17] исследовали применение настроенного демпфера массы (tuned mass damper, TMD) в системах несущего винта с гибкими лопастями, который может уменьшить амплитуду ротора вблизи определенной частоты.

Вышеупомянутые системы гашения вибрации демонстрируют хорошие демпфирующие эффекты в роторной системе, но большая часть представленных технических решений имеют сложную структуру и большие массогабаритные характеристики, для их применения требуется значительное количество конструктивных изменений роторной системы. Поэтому были разработаны и испытаны виброгасители сухого трения с более простой конструкцией и меньшей массой. В работах [18-19] рассматриваются полуактивный демпфер сухого трения. Результаты показали, что конструкция снижает установившуюся вибрацию ротора за счет регулировки нормального давления прижатия в демпфере. В работе [20] представлен управляемый демпфер сухого трения, обладающий активным магнитным упругим кольцом на упругой опоре, который значительно снизил вибрацию двухроторной системы при прохождении критических частот, находившихся в рабочем диапазоне роторной системы. Максимальный уровень снижения вибрации могло достигать 87,5%. Но в настоящее время обычные демпферы в основном сочетаются с цилиндрическими подшипниками, а демпферы, используемые с коническими подшипниками, встречаются реже. В этой статье представлена конструкция конического демпфера из стального листа, применяемый вместе с коническими подшипниками скольжения, и определены его механические свойства. Демпфер имеет компактную конструкцию и для него экспериментально доказано, что данная конструкция обладает хорошим эффектом гашения вибраций.

### Принцип работы конического листового демпфера

Структурная схема упруго-демпферной опоры ротора представлена на рисунке 1. Конструкция содержит корпус 1, наружное кольцо демпфера 2, коническую втулку подшипника 3, упругие конические листовые элементы 4, внутреннее позиционирующее кольцо демпфера 5. Вал с конической шейкой опирается на втулку подшипника. Выполненные из стального листа кольцо сложного профиля 4 установлено на конической втулке подшипника посредством кольца 5. Эти элементы демпфера реализуют упругую опорную функцию в соединении конической втулки и кожуха подшипника, в котором выполнены отверстия для подачи смазочного масла. На схеме упругого конструктивного элемента 4 обозначены: угол наклона и ширина конусной части  $\theta$ ,  $L$ ; радиусы цилиндрических участков  $R_1$ ,  $R_2$ ; толщина листов  $\delta$ . Демпфирующие элементы внутреннего кольца и демпфирующие элементы наружного кольца расположены в шахматном порядке и уложены в конусной части. Демпфирующие элементы внутреннего кольца и элементы наружного кольца плотно прилегают друг к другу. Во время вибрации ротора внутреннее и наружное кольца скользят друг относительно друга и вызывают в процессе сухого трения эффект демпфирования.

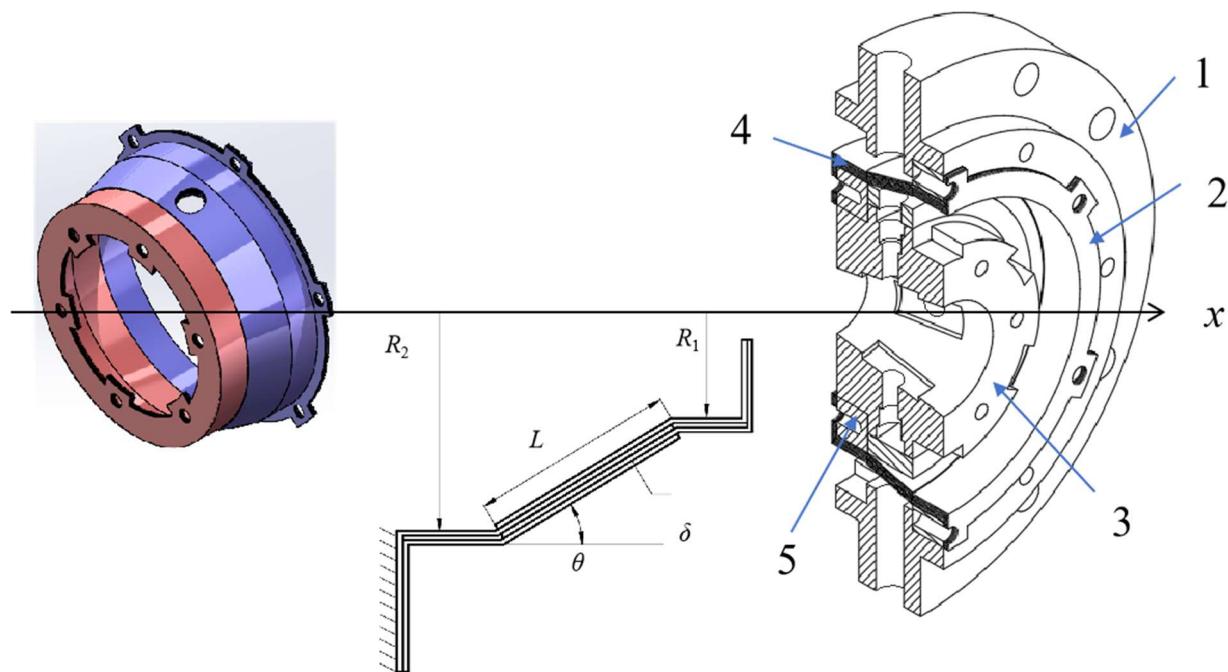


Рисунок 1 - Схема упруго-демпферной опоры с коническими элементами

### Статическая жесткость кольцевого конического демпфера

Рассмотрим двухслойный конический демпфер из стальных листов, расположенных по одному слою для внутреннего и наружного кольца (рисунок 2). Силовое воздействие конической шейки на демпфирующее кольцо можно рассматривать как распределенную силу  $q(\psi)$ , которую можно приближенно заменить силой  $F$ , сосредоточенной в точке контакта кольцевой шейки и демпфирующего кольца при  $\psi = 90^\circ$

$$F = \int_0^{2\pi} q(\psi) d\psi \quad (1)$$

Под действием внешней силы  $F$  со стороны шейки вала происходит деформация упругих колец со смещением  $\Delta x$ . Эквивалентная статическая жесткость упругих элементов может быть определена следующим образом:

$$k = \frac{F}{\Delta x} \quad (2)$$

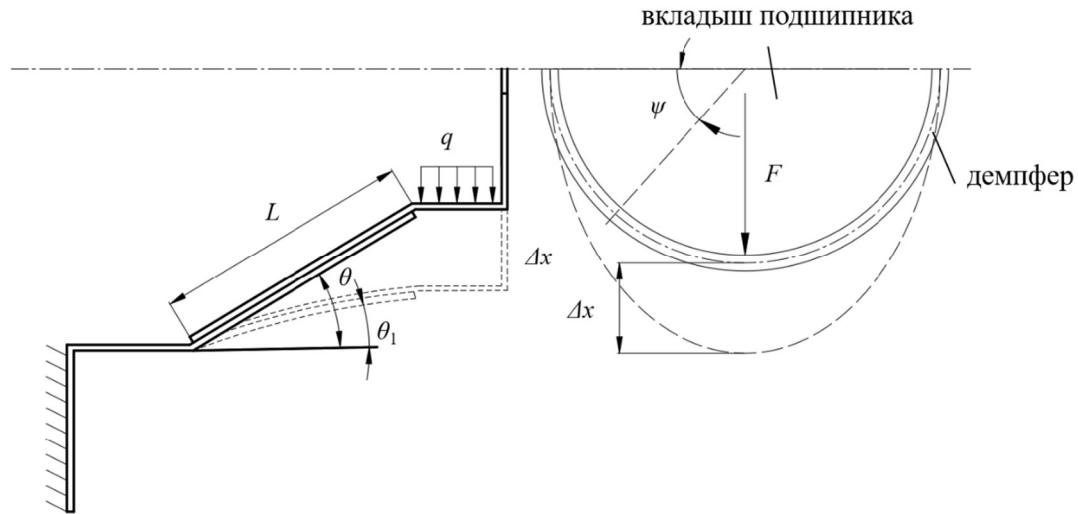


Рисунок 2 – Расчетная схема деформации конического листового демпфера  
а - Радиальный разрез; б - Осевой разрез

При толщине слоя радиусом  $r$  конусную часть можно рассматривать как тонкостенное кольцо. Симметрия кольца позволяет использовать сокращенные варианты расчетных соотношений. Согласно теории упругости базовое уравнение можно записать, как:

$$\frac{d^2w}{d\psi^2} + w = \frac{Mr^2}{EI} + \frac{Fr^3}{2EI}(1-\cos\psi) \quad (3)$$

где  $w$  - смещение кольца на угол  $\psi$ , при котором расстояние от центра круга является положительным;

$M$  - изгибающий момент;

$E$  - модуль упругости материала;

$I$  - момент инерции поперечного сечения.

Изгибающий момент  $M$  рассчитываем по формуле:

$$M = \frac{Fr^2}{2} \left( \frac{2}{\pi} - 1 \right) \quad (4)$$

Решение уравнения (3) при граничных условиях  $\frac{dw}{d\psi} = 0$  ( $\psi = 0, \frac{\pi}{2}$ ) имеет вид:

$$w = \frac{Fr^3}{4EI} \left( \cos \psi + \psi \sin \psi - \frac{4}{\pi} \right) \quad (5)$$

Максимальное значение для уравнения (5)  $w_M = \frac{Fr^3}{4EI} \left( \frac{\pi}{2} - \frac{4}{\pi} \right)$ .

Момент инерции поперечного сечения  $I$  рассчитывается по следующей формуле:

$$I = \pi r^3 n \delta \quad (6)$$

где  $n$  - количество слоев.

Тогда результат расчета радиального смещения  $\Delta x = 2 w_M$ :

$$\Delta x = \frac{F(\pi^2 - 8)}{4En\delta} \quad (7)$$

Подставив его в уравнение (1), приближенное выражение эквивалентной жесткости можно получить как:

$$k = \frac{4E(n-1)\delta}{\pi^2 - 8} \quad (8)$$

Чтобы устранить ошибку, вызванную упрощением модели, необходимо добавить коэффициент ошибки жесткости, тогда радиальную эквивалентную жесткость  $c_k$  демпфера  $k_{eq}$  можно рассчитать по следующей формуле:

$$k_{eq} = c_k k \quad (9)$$

Коэффициент погрешности жесткости в формуле  $c_k$  рассчитывается экспериментальным путем, его значение показано в следующем тексте.

### Экспериментальная установка для определения механических свойств

Цель проведения экспериментальных исследований заключалась в необходимости оценки эффективности функционирования и проверки правильности теоретических моделей расчета упругих и демпфирующих свойств конических кольцевых демпферов радиально-осевых подшипников жидкостного трения. Было выполнено проектирование и создание опытной установки (рисунок 3), включающей закрепленный на центральной оси индексной пластины демпфер, спиральное силовое нагружающее устройство, шпиндель, измерительную систему. Принцип работы устройства основан на измерении смещения оси вращения при действии радиальной нагрузки в разных направлениях. Были проведены многократные эксперименты при нагружении и разгрузке конического демпфера, получены зависимости перемещений от силы и петли гистерезиса конического демпфера из листовой стали. Величина радиальной силы измерялась с помощью силового датчика, а значение смещения - циферблочным индикатором. Расчет угла наклона позволяет получить изменение жесткости демпфера. Кроме того, потенциальную энергию упругости демпфера в течение всего цикла нагрузки и разгрузки также можно определить путем расчета площади между центральной линией кривой нагрузки демпфера и кривой разгрузки и осью  $x$ .

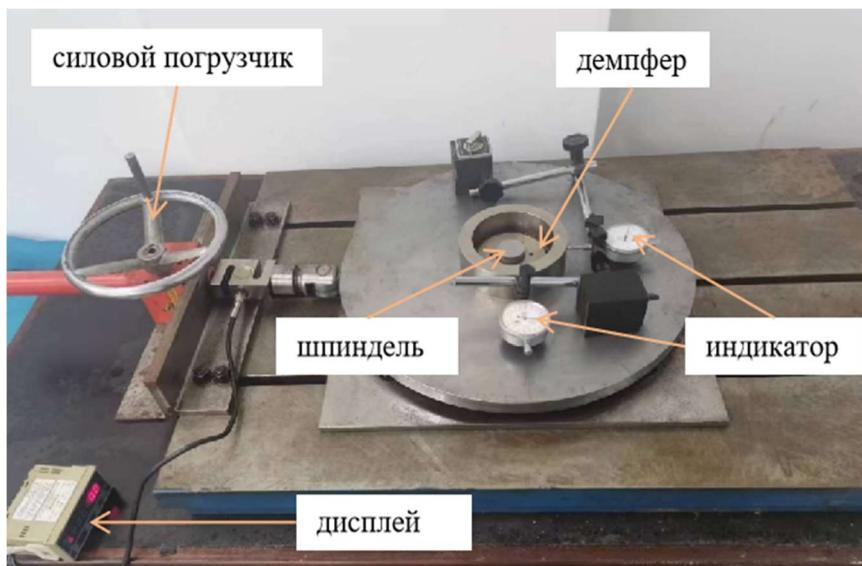


Рисунок 3 - Экспериментальная установка с коническим демпфером

Таблица 1 - Конструктивные параметры конического стального демпфера

№	Параметр	Величина	Размерность
1	Радиус большого конца демпфера, $R_2$	16,88	мм
2	Малый конечный радиус демпфера, $R_1$	10,18	мм
3	Длина конуса демпфера, $L$	16,56	мм
4	Угол конуса демпфера, $\theta$	15	°
5	Модуль упругости, $E$	206	ГПа

### Результаты расчетов и физического эксперимента

На рисунок 4 представлена экспериментальная диаграмма жесткости демпфера с толщиной слоя  $\delta = 0,5$  мм и числом слоев  $n = 4$  (по 2 слоя внутри и снаружи). На основании экспериментальных данных можно отметить хорошее согласование экспериментальных и теоретических значений при коэффициенте жесткости  $c_k = 0,26$ . При относительно небольшом деформационном смещении значение жесткости демпфера резко уменьшается по мере увеличения смещения и быстро стабилизируется на нормальном значении по мере увеличения значения деформации. Величина жесткости демпфера снижается при небольшой деформации, главным образом из-за того, что между контактными поверхностями внутреннего и наружного колец демпфера при малой деформации имеется зазор.

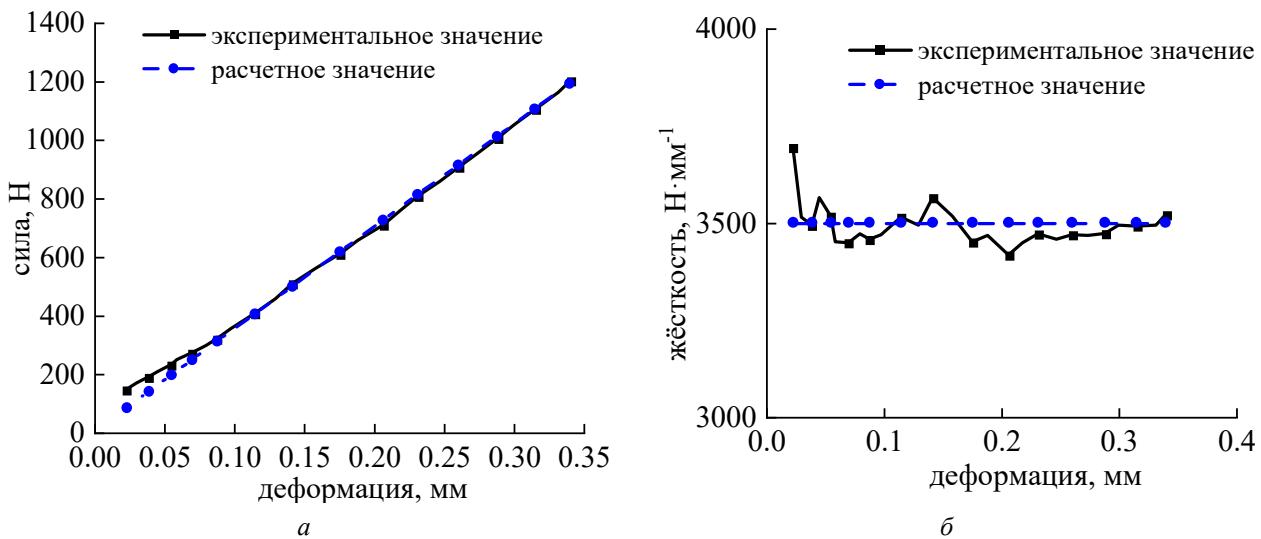


Рисунок 4 - Экспериментальная схема  $\delta = 0,5$  мм,  $n = 4$ :  
а - диаграмма «нагрузка-перемещение»; б - диаграмма «жесткость-перемещение»

На рисунок 5 показана экспериментальная диаграмма демпфера с толщиной листов  $\delta = 0,3$  мм. Видно, что теоретическое значение и экспериментальное значение хорошо согласуются, когда жесткость стабильна, что показывает, что теоретические результаты имеют определенную правильность и обоснованность.

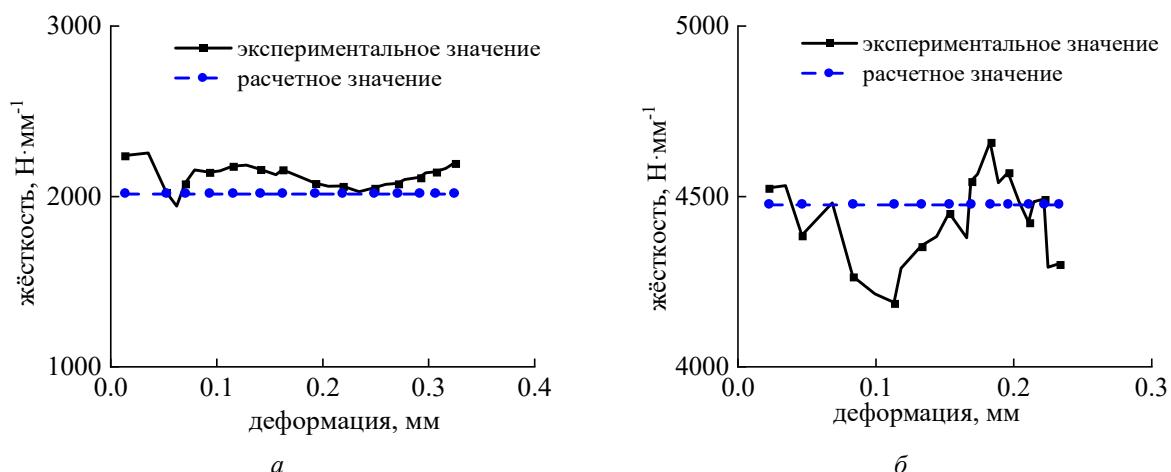


Рисунок 5 - Экспериментальная диаграмма  $\delta = 0,3$  мм: а –  $n=4$ , б –  $n=8$

Таблица 2 - Толщина слоя и количество слоев жесткости демпфера

№	Толщина (мм)	Количество слоев	Значение анализа жесткости	Экспериментальное значение жесткости (среднее)
1	0,3	4	2 013,97	2139,78
2	0,3	8	4 475,49	4 423,16
3	0,5	4	3 499,87	3 469,83

Анализ представленной информации свидетельствует, что при одинаковой толщине слоя демпфера большее количество слоев обеспечивает большую жесткость. При  $\delta = 0,3$  мм средняя экспериментальная жесткость с  $n = 8$  значительно больше жесткости демпфера с числом слоев  $n = 4$ . Экспериментальная жесткость при постоянном числе слоев увеличивается с толщиной демпфера. Для демпфера с четырьмя слоями и толщиной  $\delta = 0,5$  мм средняя экспериментальная жесткость в 1,632 превышает значение при  $\delta = 0,3$  мм.

Основной акцент в данной работе сделан на определении жесткости конического кольцевого демпфера новой конструкции с листовыми стальными пластинами. Полученные значения статической жесткости позволяют определить возникающие в упругих элементах перемещения, значения которых в дальнейшем могут использоваться при проектировании демпферных устройств подшипниковых узлов. В этом случае радиальная деформация упругих элементов опоры определяется по формуле [21]

$$\delta_0 = + \frac{mng}{k} + k_d e,$$

где  $k$  - коэффициент жесткости опоры;

$m$  - масса ротора, приходящаяся на данную опору;

$n$  - коэффициент вертикальной статической перегрузки, возникающей при движении роторной машины;

$g$  - ускорение свободного падения;

$k_d$  - коэффициент динамического усиления колебаний цапфы ротора в опоре ( $k_d = 4\dots 6$ );

$e$  - эксцентриситет разбалансированности ротора, который принимается равным наибольшей допустимой величины в процессе эксплуатации для проектируемого объекта.

Для предотвращения больших радиальных деформаций и возникающих напряжений упругих элементов в опоре выполняются ограничители радиальных перемещений, которые вступают в работу лишь при экстремальных нерасчетных условиях. Для обеспечения центрального расположения ротора по отношению к корпусу базовая поверхность упругих элементов смещается на величину статической деформации опоры.

### Заключение

В данной статье представлен фрагмент комплексных теоретико-экспериментальных исследований конического кольцевого демпфера сухого трения радиально-осевых опор роторов, связанный с определением статических значений жесткости. На основе фундаментальных законов теории упругости и динамики машин были получены расчетные зависимости для определения статической жесткости конического демпфера. Проведенная процедура верификации разработанной модели расчета на основе уравнения (9) свидетельствует о качественном согласовании с результатами физического эксперимента, количественное отличие результатов не превышает 7%, что свидетельствует о достаточно высоком уровне адекватности разработанной модели расчета статической жесткости конического кольцевого демпфера с листовыми упругими элементами. Проведенные вычислительные эксперименты свидетельствуют о значительной зависимости жесткости демпфера от толщины листов (относительное увеличение более 50 %) и количества упругих листов (увеличение жесткости примерно в 2 раза). Полученные результаты и разработанная методика расчета позволяют оценить уровень жесткости демпфера на этапах структурно-параметрического синтеза роторных агрегатов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кельзон А. С. Динамика роторов в упругих опорах / А. С. Кельзон, Ю. П. Циманский, В. И. Яковлев - М.: Наука. - 1982. -280с.
2. Белоусов А. И. Теория и проектирование гидродинамических демпферов опор роторов / А. И. Белоусов, В. Б. Балыкин, Д. К. Новиков – С.: Издательство СНЦ РАН. - 2002. -335с -ISBN 5-93424-087-0.
3. Дмитренко А. И. Упруго-демпферная опора ротора / А. И. Дмитренко, П. В. Якубенко // Патент РФ № 2099606С1 - 1997
4. Анатолий Г. К. Упруго-демпферная опора ротора / Г. К.Анатолий, И. П. Виктор, В. Л. Андрей // Патент РФ № 2622161С1. - 2017.
5. Li S. B. Conical dynamic and static pressure sliding bearing with controllable damping, rotating system and control method / S. B. Li, Y. F. Liu // Патент №. CN112943792B. - 2021.
6. Li S. B. Vibration damping system and vibration damping bearing / S. B. Li, S. M. Luo // Патент №. CN108843690B. - 2020.
7. Бычков М. В. Колебания ротора на активных упругодемпферных опорах / М. В. Бычков, Д. В. Шутин// Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины. – 2014. -С. 328-332.

8. Мартыненко Г. Ю. Методика экспериментальных исследований динамики модельного ротора в комбинированном магнитном подвесе / Г. Ю. Мартыненко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Динаміка та міцність машин, – 2013. – №. 58. – С. 125-135.
9. Давыдов А. В. Исследование характеристик вертикального ротора с гидродинамическими демпферами / А. В. Давыдов, С. А. Дегтярев // Участникам Международной научно-технической конференции «Клиновские чтения—2018». – 2018. – С. 178.
10. Хайруллин И. Х. Исследование влияния геометрии ротора на аксиальные силы в магнито-электрическом демпфере амортизационной системы / И. Х. Хайруллин, О. А. Юшкова // Электротехника – 2014. – №. 7. – С. 36-39.
11. Wang J. Dynamic performance of a novel integral magnetorheological damper-rotor system / J. Wang, Y. Liu, Z. Qin, L. Ma, F. Chu // Mechanical Systems and Signal Processing – 2022. – Т. 172. – С. 109004.
12. Zapoměl, J. Vibrations attenuation of a Jeffcott rotor by application of a new mathematical model of a magnetorheological squeeze film damper based on a bilinear oil representation / J. Zapoměl, P. Ferfecki, P. Forte // Acta Mech – 2019. – Т. 230. – С. 1625-1640.
13. Zaccardo, V. M. Active magnetic dampers for controlling lateral rotor vibration in high-speed rotating shafts/ V. M. Zaccardo, G. D. Buckner // Mechanical Systems and Signal Processing – 2021. – Т. 152. – С. 107445.
14. Kumar, T. Numerical Investigation of Semi-active Torsional Vibration Control of Heavy Turbo-generator Rotor using Magnetorheological Fluid Dampers / T. Kumar, R. Kumar, S. C. Jain // Journal of Vibration Engineering & Technologies. – 2021. – С. 1-15.
15. Jiang J. Design and control performance of a frictional tuned mass damper with bearing-shaft assemblies / J. Jiang, S. C. M. Ho, N. J. Markle, N. Wang, G. Song // Journal of Vibration and Control. – 2019. – Т. 25. – №. 12. – С. 1812-1822.
16. Kang X. Auxiliary bearing squeeze film dampers for magnetic bearing supported rotors / X. Kang, A. Palazzolo, W. Zhong // Tribology international – 2020. – Т. 146. – С. 106181.
17. Tehrani G. G. Vibration mitigation of a flexible bladed rotor dynamic system with passive dynamic absorbers/ G. G. Tehrani, M. Dardel // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. – 2019. – Т. 69. – С. 1-30.
18. Liao M. F. Active elastic support/dry friction damper with piezoelectric ceramic actuator / M.F. Liao, M. B. Song, S. J. Wang // Shock and Vibration. – 2014. – Т. 2014.
19. Wu Y. G. Design of semi-active dry friction dampers for steady-state vibration: sensitivity analysis and experimental studies / Y. G. Wu, L. Li, Y. Fan, H. Y. Ma, W. J. Wang, J. L. Christen, M. Ichchou // Journal of Sound and Vibration. – 2019. – Т. 459. – С. 114850.
20. Zhang P. Vibration control of active dry friction damper – dual rotor system based on rotational speed region on-off control / P. Zhang, J. X. He, X. H. Gao, C. S. Zhu // Journal of Aerospace Power. – 2023. - Т. 10. – С. 13224.
21. Леонтьев М.К. Конструкция и расчет демпферных опор ГТД: учебное пособие – М.: Изд-во МАИ. – 2020. - 78с.

**Лю Ифань**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г Орёл  
Аспирант кафедры мехатроники, механики и робототехники  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел: +7(953)626-72-14  
E-mail: liuyifan0094@qq.com

---

LIU YIFAN

**STATIC STIFFNESS OF CONICAL RING DAMPERS  
OF FLUID FILM BEARINGS**

**Abstract.** The operating principle and design of a conical ring damper for radial-axial fluid friction bearings are considered. Expressions were obtained for calculating the static stiffness of a damper of a new design with sheet elements. A pilot plant was created and experimental studies of the mechanical characteristics of a conical damper were carried out. The results of a comparative analysis of experimental and calculated data are presented.

**Keywords:** elastic-damper rotor support, conical annular dry friction damper, mechanical characteristics, rigidity, angular contact fluid friction bearing, modeling, experimental setup.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Kelzon A. S. Dynamics of rotors in elastic supports / A. S. Kelzon, Yu. P. Tsimansky, V. I. Yakovlev - Moskva: Nauka. - 1982. -280c.

2. Belousov A.I. Theory and design of hydrodynamic dampers of rotor supports / A.I. Belousov, V.B. Balyakin, D.K. Novikov - Samara: Publishing house SNTs RAN. - 2002. -335c -ISBN 5-93424-087-0.
3. Dmitrenko A. I. Elastic-damper rotor support / A. I. Dmitrenko, P. V. Yakubenko // Patent RF No. 2099606C1 - 1997
4. Anatoly G. K. Elastic-damper rotor support / G. K. Anatoly, I. P. Victor, V. L. Andrey // Patent RF No. 2622161C1. - 2017.
5. Li S. B. Conical dynamic and static pressure sliding bearing with controllable damping, rotating system and control method / S. B. Li, Y. F. Liu // Patent No. CN112943792B. - 2021.
6. Li S. B. Vibration damping system and vibration damping bearing / S. B. Li, S. M. Luo // Патент No. CN108843690B. - 2020.
7. Bychkov M. V. Rotor vibrations on active elastic-damper supports / M. V. Bychkov, D. V. Shutin// Vibration technologies, mechatronics and controlled machines. – 2014. -C. 328-332.
8. Martynenko G. Yu. Methodology of experimental studies of the dynamics of a model rotor in a combined magnetic suspension / G. Yu. Martynenko // Bulletin of the National Technical University "KHPI". Series: Dynamics of the same number of cars, – 2013. – No. 58. – C. 125-135.
9. Davydov A.V. Investigation of the characteristics of a vertical rotor with hydrodynamic dampers / A.V. Davydov, S. A. Degtyarev // To the participants of the International scientific and technical conference "Klimovsk readings—2018". – 2018. – C. 178.
10. Khairullin I. H. Investigation of the influence of rotor geometry on axial forces in a magneto-electric damper of a shock-absorbing system / I. H. Khairullin, O. A. Yushkova // Electrical Engineering – 2014. – No. 7. – C. 36-39.
11. Wang J. Dynamic performance of a novel integral magnetorheological damper-rotor system / J. Wang, Y. Liu, Z. Qin, L. Ma, F. Chu // Mechanical Systems and Signal Processing— 2022. – T. 172. – C. 109004.
12. Zapoměl, J. Vibrations attenuation of a Jeffcott rotor by application of a new mathematical model of a magnetorheological squeeze film damper based on a bilinear oil representation / J. Zapoměl, P. Ferfecki, P. Forte// Acta Mech– 2019. – T. 230. – C. 1625-1640.
13. Zaccardo, V. M. Active magnetic dampers for controlling lateral rotor vibration in high-speed rotating shafts / V. M. Zaccardo, G. D. Buckner// Mechanical Systems and Signal Processing. – 2021. – T. 152. – C. 107445.
14. Kumar, T. Numerical Investigation of Semi-active Torsional Vibration Control of Heavy Turbo-generator Rotor using Magnetorheological Fluid Dampers / T. Kumar, R. Kumar, S. C. Jain // Journal of Vibration Engineering & Technologies. – 2021. – C. 1-15.
15. Jiang J. Design and control performance of a frictional tuned mass damper with bearing–shaft assemblies / J. Jiang, S. C. M. Ho, N. J. Markle, N. Wang, G. Song // Journal of Vibration and Control. – 2019. – T. 25. – No. 12. – C. 1812-1822.
16. Kang X. Auxiliary bearing squeeze film dampers for magnetic bearing supported rotors / X. Kang, A. Palazzolo, W. Zhong // Tribology international – 2020. – T. 146. – C. 106181.
17. Tehrani G. G. Vibration mitigation of a flexible bladed rotor dynamic system with passive dynamic absorbers / G. G. Tehrani, M. Dardel // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. – 2019. – T. 69. – C. 1-30.
18. Liao M. F. Active elastic support/dry friction damper with piezoelectric ceramic actuator / M.F. Liao, M. B. Song, S. J. Wang // Shock and Vibration. – 2014. – T. 2014.
19. Wu Y. G. Design of semi-active dry friction dampers for steady-state vibration: sensitivity analysis and experimental studies / Y. G. Wu, L. Li, Y. Fan, H. Y. Ma, W. J. Wang, J. L. Christen, M. Ichchou // Journal of Sound and Vibration. – 2019. – T. 459. – C. 114850.
20. Zhang P. Vibration control of active dry friction damper – dual rotor system based on rotational speed region on-off control / P. Zhang, J. X. He, X. H. Gao, C. S. Zhu // Journal of Aerospace Power. – 2023. - T. 10. – C. 13224.
21. Leontiev M.K. Design and calculation of GTE damper supports: textbook – Moskva: Publishing house MAI. – 2020. - 78c.

**Liu Yifan**

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel  
Graduate Student of the Department Mechatronics, Mechanics and Robotics  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
Phone number: +7(953)626-72-14  
E-mail: liuyifan0094@qq.com

© Лю Ифань, 2024

А.В. СЫТИН, А.М. ГОРИН, С.С. ВНУКОВ, А.Д. СЕРЕБРЕННИКОВ, И.А. СЕРЕНКО

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МУФТ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РОТОРНЫХ СИСТЕМ

**Аннотация.** В статье представлен способ автоматизации экспериментальных исследований роторных систем на основании применения электромагнитных муфт. Применение электромагнитных муфт в системе обратной связи с датчиком частоты вращения позволяет автоматизировать серии экспериментов по многократному пуску-останову роторной системы, а также при прохождении критических частот с отключенным двигателем в рамках свободного выбега. Представлена конструкция электромагнитной фрикционной муфты и основные расчетные зависимости.

**Ключевые слова:** электромагнитная муфта, автоматизация эксперимента, экспериментальные исследования роторных систем,

### Введение

Роторные машины, основным узлом которых являются вращающиеся в опорах валы с закрепленными на них дисками и другими элементами (далее – роторная система), – обширный класс машин тяжелого машиностроения, энергетики, двигателестроения, приборостроения. Снижение их вибрации до допустимого уровня – необходимое условие надежной и безопасной эксплуатации [1-4]. Тенденции развития современных роторных машин направлены на уменьшение массы, увеличение удельных характеристик. Это приводит к тому, что в них имеет место широкий спектр вибрационных явлений, снижающих надежность. Например, тенденция снижения массы авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) проявляется в снижении жесткости валов и корпусных деталей, что вместе с применением новых конструктивных решений усложняет характер вибрационных процессов и может существенно затруднить решение проблемы ограничения вибраций [5-7]. Для исключения из рабочих режимов двигателя недопустимых вибрационных явлений необходимо понимание причин их возникновения, выявление диагностических признаков, разработка мер по борьбе с вибрациями. Мировой опыт разработки ГТД показывает, что проблемы вибрации роторов необходимо решать еще на этапе проектирования, в противном случае существенно увеличиваются объем и сроки работ по вибрационной доводке двигателя. Для этого требуются надежные математические модели. В настоящее время разработаны многочисленные математические модели вибраций роторных систем различного уровня сложности, по-разному учитывающие демпфирование в опорах, нелинейности в соединениях и т.д. [8-11]. Практическое использование расчетных моделей при решении инженерных задач предотвращения недопустимых вибраций на стадии проектирования машин предполагает предварительную верификацию по экспериментальным данным. Получение пригодных для верификации экспериментальных данных предполагает проведение контролируемых экспериментов на натурных машинах или на установках, которые позволяют воспроизводить характерные эффекты вибрации соответствующих роторных систем. Использование экспериментальных установок модульной конструкции, имеющих высокую вариативность исполнения конструктивных компоновок и способных реализовывать широкий спектр вибрационных явлений, в сравнении с натурными исследованиями, дает широкий спектр возможностей для понимания вибрационных процессов, позволяет научиться распознавать признаки неисправностей по параметрам вибрации. Такой подход позволяет в наиболее явном виде моделировать влияние конструктивных особенностей на вибрационные характеристики роторной системы, упрощая таким образом процесс верификации математических моделей. Проведение исследования на экспериментальной роторной установке обладает следующими преимуществами по сравнению с натурным исследованием [12, 13]: широкие возможности в части количества и расположения датчиков, относительно низкий уровень помех, возможность искусственного введения дефектов для оценки информативности диагностических признаков, низкая стоимость проведения эксперимента. В некоторых случаях проведение натурных экспериментов просто не представляется возможным, так как вибрационные явления, возникающие в ходе эксперимента, приводят к катастрофическим последствиям.

## Основная часть

Одним из главных направлений решения задачи повышения эксплуатационных и качественных показателей продукции машиностроения является совершенствование конструкторской подготовки студентов вузов, а также научных сотрудников. Важное место в ней занимают лабораторные комплексы и оборудование, которые облегчают изучение физической сущности работы и усвоение методов оборудования и технологий расчета [14, 15]. Лабораторные и экспериментальные исследования обеспечивают связь теории с практикой, развивают самостоятельность и способность к постановке и проведению экспериментов, пониманию и интерпретации фактов, к анализу явлений и синтезу, к оценке полученной информации, применению знаний на практике. На уровне учебных дисциплин лабораторные работы обеспечивают знакомство с оборудованием, приборами, средствами измерения, с методикой исследования, пополняя знания фактами, они позволяют определить и проверить теоретические зависимости. Лабораторные работы играют большую роль в учебном и научном процессе по многим фундаментальным, общеинженерным и специальным дисциплинам, которые изучаются в высших и средних учебных заведениях. Они являются одной из форм учебных занятий и одним из практических методов обучения, в котором учебные цели достигаются при постановке и проведении студентами экспериментов, опытов, исследований с использованием специального оборудования, приборов, измерительных инструментов и других технических приспособлений. На лабораторных занятиях студенты воспринимают, наблюдают, исследуют явления природы, технические и другие процессы, изучают объекты техники, устройство и принцип действия измерительной аппаратуры, методику измерений. В зависимости от решаемых задач, различают ознакомительные, экспериментальные и проблемно-поисковые лабораторные работы [16, 17]. В ознакомительных лабораторных работах проводится изучение конструктивных особенностей, устройство средств производственной деятельности (оборудования, инструментов приспособлений и т.д.) и средств исследовательской деятельности (испытательных установок, приборов и т.д.), а также их наладка и настройка. Экспериментальные лабораторные работы включают экспериментальные и исследовательские задания. Это могут быть задания по изучению и отработке методики проведения различных исследований (например, методики определения ударной вязкости при изучении сопротивления материалов), по конструированию, переконструированию и доконструированию различных схем и приспособлений (например, составление электрических схем для измерения свойств объектов, изменение конструкции зубчатой передачи для достижения вариаций передаточного числа, по исследованию влияния различных факторов на свойства объектов, по определению степени соответствия экспериментальных и расчетных данных, по проверке, иллюстрации, подтверждению законов, закономерностей и т.д.). Проблемно-поисковые работы также включают постановку и проведение экспериментов [18]. Отличаются они только степенью проблемности экспериментальных задач. При этом речь идет об уровнях проблемности этих задач: новизне объектов, условий, в которых проводится эксперимент по сравнению с известными ранее. К этой группе лабораторных работ относятся и работы по проверке различных гипотез учебного и научного уровня проблемности.

Главной проблемой современного машиностроения является достижение высокой точности, жесткости и виброустойчивости высокоскоростных турбомашин. Одним из важнейших узлов постоянно подвергающийся статическим и динамическим нагрузкам является роторно-опорный узел турбомашины. Эксплуатационные показатели, показатели ресурса и надежности подобных машин определяются во многом способностью воспринимать внешние воздействия без разрушения и нарушения работоспособности опорными узлами.

Интеллектуальные технологии являются наиболее перспективным направлением развития практических областей науки и техники, в том числе и машиностроения. Интегрирование механических, пневмогидравлических, электрических, электромагнитных и компьютерных систем обеспечивает синергетический эффект в повышении технико-экономических характеристик, надежности и конкурентоспособности изделий. Умные машинные технологии качественно повышают спектр возможностей машин на основании объединения функций автоматического контроля и диагностики параметров, активного управления движением отдельных элементов и объекта в целом, возможности адаптации к изменению условий работы [19, 20].

Можно выделить три базовых уровня интеллектуализации машин:

- 1) Механические, гидравлические и другие устройства, оснащенные сенсорными элементами, обеспечивающими контроль и диагностику работоспособности.
- 2) Совокупность элементов первого уровня совместно с микроконтроллерами, воспроизводящими функции программного управления и автоматизации.
- 3) Машины, имеющие компьютерное управление на основе сложных математических моделей, способное осуществлять самодиагностику и адаптироваться к неопределенности внешней среды.

В настоящее время практически во всех технических системах используются мехатронные устройства с активным управлением, рисунок 1. В автомобилях это навигационные и тормозные системы, приборы для ночного движения и парковки, управление работой двигателя и климатконтроль в салоне. Робототехника представляет собой самостоятельное весьма разветвленное направление исследований, включающее технологические, транспортные, бытовые, военные и другие аспекты. Интеллектуальные системы входят в состав аудио и видеотехники, полиграфического и офисного оборудования, а также практически всех видов транспортной техники. Особо важную роль умные устройства играют в системах навигации, управления и безопасности ракетно-космической и авиационной техники.



Рисунок 1 – Принципиальная схема активного управления

Электромагнитные муфты – исполнительные электромеханические устройства, служащие для дискретного управления механическим приводом станков и рабочих машин (передачи крутящих моментов между валами). [18]

При включении муфты магнитный поток  $\Phi$  (рисунок 2), созданный током, протекающим по виткам катушки, проходит через корпус, пакет внутренних 6 и наружных 7 дисков и замыкается через корпус 5. Якорь притягивается к корпусу и сжимает диски, в результате муфта передает крутящий момент. Все детали муфты монтируют на втулке 3, которую устанавливают на валу.

Расцепление муфты после отключения катушки от источника питания происходит за счет упругости наружных дисков, имеющих волнистую форму. Сталь, из которой изготавливают диски, должна иметь необходимые фрикционные свойства, большую механическую износостойкость и высокую магнитную проницаемость при малой остаточной индукции.

В данной конструкции электромагнитной муфты передача вращения от приводного вала к ведомому осуществляется за счет трения между фрикционными дисками. Если возникает необходимость отсоединения муфты, под действием пружины якорь муфты смещается вправо и поверхность фрикционного диска открывается, что приводит к прекращению вращения ведомого вала.

Кроме того, для увеличения передаваемого крутящего момента в некоторых конструкциях используются несколько пар фрикционных дисков. Чем больше пар дисков, тем больше передаваемый крутящий момент. Однако основным недостатком такого типа муфт

является наличие скользящего контакта, что может привести к износу дисков и снижению надежности муфты.

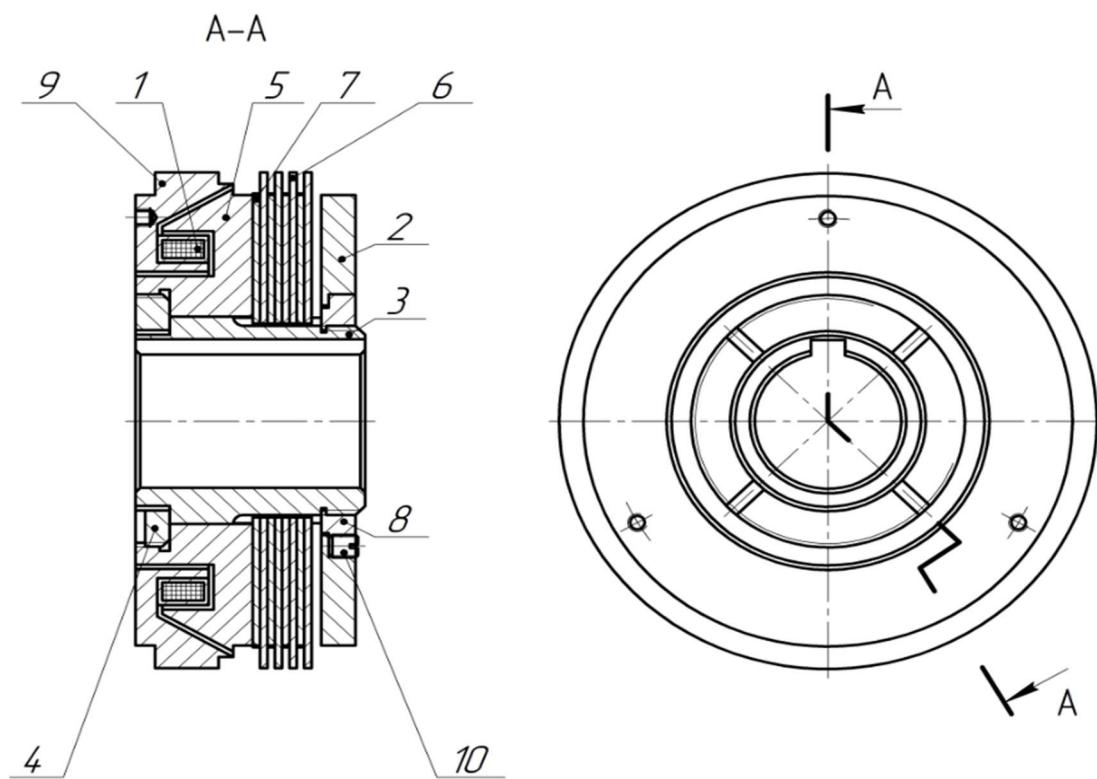


Рисунок 2 - Электромагнитная многодисковая фрикционная муфта ЭМ-12:

1 - Электромагнит, 2 - крышка, 3 - втулка, 4 - кольцо, 5 - корпус, 6 - внутренний диск, 7 - наружный диск, 8 - кольцо, 9) корпус, 10 - винт

Другими словами, в современной технике для управления передачей крутящего момента широко используются электромагнитные фрикционные муфты (ЭФМ), которые обладают рядом преимуществ перед другими устройствами. Параметры работы ЭФМ зависят от тягового усилия, действующего на якорь управляющего электромагнита. Это усилие в ЭФМ данного типа имеет две составляющие, величины которых зависят от воздушного зазора  $\delta$  между якорем и магнитопроводом и от величины тока  $i$  в УЭ:

$$F_{T(\delta,i)} = F_{\text{эм}}(i) - F_{np}(\delta) \geq 0, \quad (1)$$

где  $F_{\text{эм}}(i)$  – тяговое усилие, создаваемое управляющим электромагнитом;

$F_{np}(\delta)$  – усилие возвратной пружины.

Момент трения во фрикционном узле равен

$$M_{\text{тр}} = k_{\text{тр}} \cdot R_{\text{ср}} \cdot F_{\text{T}}(\delta, i), \quad (2)$$

где  $k_{\text{тр}}$  – коэффициент трения;

$R_{\text{ср}}$  – средний радиус действия силы трения.

Величина тягового усилия, действующего на якорь при обесточенной обмотке УЭ, зависит от усилия возвратной пружины  $-F_{np}(\delta)$ . Знак минус перед усилием  $F_{np}$  показывает, что в ЭФМ оно направлено встречно усилию  $F_{\text{эм}}$ .

Рассмотрим процессы, протекающие в переходных режимах работы ЭФМ. Процессы во фрикционном узле (ФУ) определяются соотношением величин момента трения  $M_{\text{тр}}$  в фрикционном узле, приведенного момента сил сопротивления  $M_c$  механизма и врачающего момента  $M_{\text{вр}}$  двигателя [2].

Процесс замыкания фрикционного узла. В состоянии без электрического тока фрикционная муфта разомкнута, отсутствует передача крутящего момента между полумуфтами. При подаче напряжения на управляющий электромагнит, создается магнитное поле и тяговое усилие, которое преодолевая усилие предварительно деформированных фрикционных дисков, обеспечивает плавное сцепление муфты и передачу крутящего момента.

Для инженерных расчетов можно принять, что усилие прижатия полумуфты  $F_{вкл}$  при этом нарастает пропорционально времени  $t$ .

Примем в этом режиме работы зависимость между моментом  $M_{mp}$  и временем линейной. Тогда момент трения  $M_{mp}$  в муфте будет возрастать по следующему закону:

$$M_{mp} = k_1 \cdot t, \quad (3)$$

где  $k_1 = M_{max} / t_{вкл}$  – коэффициент пропорциональности.

В процессе замыкания муфты возможны вибрации и отскоки ведущей полумуфты. Однако, если время замыкания муфты больше, чем период колебаний всего электропривода, то эти переходные процессы можно пренебречь.

Время полного включения муфты  $t_{вкл}$ , которое определяется по кривой нарастания тока в обмотке (методика расчета тока приведена в [1, 11]), наступает в тот момент, когда выполняется условие

$$F_{T(\delta,i)} = F_{\vartheta_m}(i, \delta_0) - F_{np}(\delta_0) = 0. \quad (4)$$

Зависимость  $M_{tr} = f(t)$  имеет вид прямой (рисунок 2), где  $t_1$  – время снижения момента  $M_{tr}$  до значения  $M_c$ ;  $t_2$  – время, за которое момент  $M_{tr}$  на ведомом валу исчезнет полностью;  $t_{выкл}$  – время полного выключения муфты;  $t_{ост}$  – время полной остановки выходного вала.

Временем полного включения муфты  $t_{вкл}$  считается время, при котором момент трения  $M_{mp}$  достигает своего максимального значения  $M_{max}$  (рисунок 3). Величина  $t_{вкл}$  также определяется по кривой изменения тока в обмотке ЭУ. Процесс замыкания фрикционного узла можно разбить на два этапа.

На первом этапе, который начинается с момента соприкосновения полумуфт, момент трения  $M_{mp}$  нарастает до величины момента сил сопротивления  $M_c$ , приложенного к ведомому валу, причем  $t_3 = M_c / k_1 = (M_c / M_{max}) t_{вкл}$ .

Очевидно, что на этом этапе ведомая полумуфта не вращается и практически вся энергия трения идет на нагрев фрикционного узла:

$$A_{TP} = \frac{1}{2} M_c \omega_1 t_3 = \frac{1}{2} \cdot \frac{M_c^2}{M_{max}} \omega_1 t_{вкл}. \quad (5)$$

На втором этапе замыкания при  $t > t_3$  момент сил трения  $M_{tr}$  станет больше момента  $M_c$  и ведомая полумуфта начнет вращаться с некоторым ускорением до тех пор, пока скорости обеих полумуфт не сравняются. Это произойдет в момент времени  $t_{цеп}$ . Длительность этого этапа зависит от соотношения величин времени  $t_{цеп}$  и  $t_{вкл}$ . По окончании второго этапа муфта полностью замкнута и при  $t \geq t_{вкл}$  момент трения равен  $M_{tr} = M_{max} = \text{const}$ . Очевидно, что на втором этапе полная работа, которую совершает ведомая полумуфта, состоит из трех частей – полезной работы  $A_{\Pi}$  по преодолению  $M_c$ , работы  $A_J$ , которая расходуется на разгон ведомой муфты и приводного механизма, и работы сил трения  $A_{TP}$  при проскальзывании полумуфт. Величины  $A_{\Pi}$  и  $A_J$  могут быть вычислены по уравнениям.

$$A_{\Pi} = \int_{t_1}^{t_{цеп}} M_c \omega_2 dt; A_J = \frac{J \omega_1^2}{2}. \quad (6)$$

Время полного сцепления муфты  $t_{цеп}$  можно определить из уравнения нарастания скорости выходного вала:

$$\omega(t) = \frac{1}{J} \int_0^1 (M - M_c) dt. \quad (7)$$

Очевидно, что для улучшения эксплуатационных свойств ЭФМ необходимо уменьшать величины  $M_{tr}$  и времени  $t_{цеп}$ . Наиболее просто это достигается при включении муфты при уменьшенной нагрузке  $M_c$  и скорости  $\omega_0$ . Этого можно добиться и путем уменьшения времени  $t_{вкл}$ , но при этом снизится плавность включения муфты, что приведет к ударной нагрузке на валы. Анализ показал, что условия включения муфты будут оптимальными.

$$t_{вкл} \geq 2\omega_0 \frac{M_{max}}{(M_{max} - M_c)^2} \quad (8)$$

В этом случае полное сцепление полумуфт будет обеспечиваться при условии, что в конце сцепления  $M_{tr} < M_{max}$  и нагрузка на валы не будет превышать допустимых значений.

- если  $t_{ост} = t_{выкл}$ , то

$$A_{TP} = M_c^4 t_{выкл}^2 / (24 J M_{max}^2) \quad (9)$$

На первом этапе размыкания фрикционного узла и при  $t > t_{выкл}$ , когда  $M_{mp} = 0$ , работа сил трения и нагрев фрикционной пары отсутствуют.

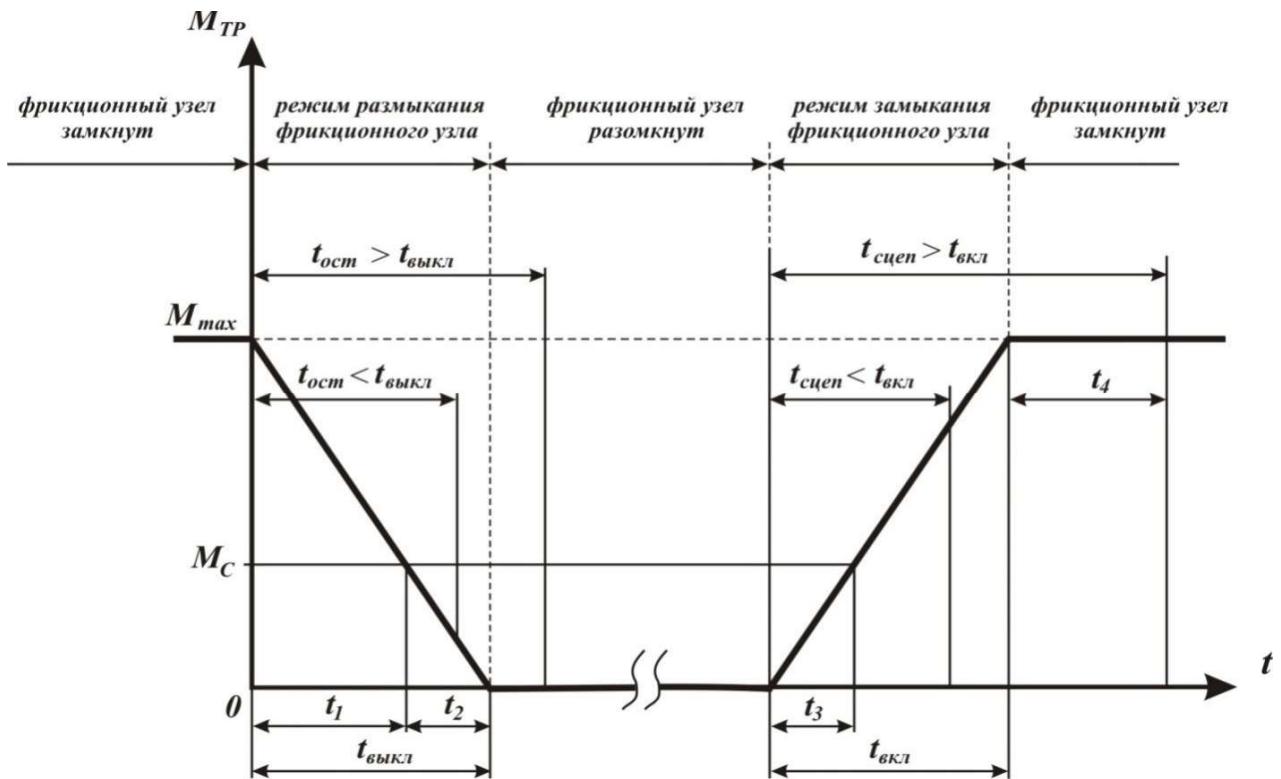


Рисунок 3 – Изменение момента трения в режимах размыкания и замыкания фрикционного узла муфты

Время остановки выходного вала  $t_{ocm}$  вычисляется по выражению

$$t_{ocm} = t_1 + \sqrt{2J\omega_0/k} = \frac{[(M_{max} - M_c)t_{выкл}]}{M_{max}} + \sqrt{2J\omega_0 t_{выкл}/M_{max}} \quad (10)$$

Если при расчете по формуле (10) получим, что  $t_{ocm} \leq t_{выкл}$ , то это значение  $t_T$  является действительным. Если получим, что  $t_{ocm} > t_{выкл}$ , то его надо вычислять по формуле

$$t_{ocm} = \frac{J\omega_0}{M_c} + t_{выкл} \left(1 - \frac{M_c}{2M_{max}}\right) \quad (11)$$

Процесс размыкания фрикционного узла начинается с момента снятия напряжения с управляющего электромагнита и происходит за счет возвращения геометрии фрикционных дисков в исходное состояние.

В режиме размыкания муфты можно выделить два этапа: на первом этапе ведущий и ведомый валы вращаются с одинаковой скоростью  $\omega_0, t. k. M_{mp} > M_c$ ; на втором этапе ведомый вал начинает отставать от ведущего, т. к.  $M_{mp} < M_c$ . После полного исчезновения момента  $M_{mp}$  на ведомом валу имеет место режим выключенного состояния муфты.

На втором этапе происходит взаимное проскальзывание фрикционных элементов муфты, причем остановка ведомого вала возможна как при  $t_{выкл} < t_T$ , так и при  $t_{выкл} > t_T$ .

Величины  $t_1$  и  $t_2$  могут быть рассчитаны по формулам

$$t_1 = (M_{max} - M_c) \cdot \frac{t_{выкл}}{M_{max}}; t_2 = t_{выкл} - t_1 = M_c \cdot t_{выкл}/M_{max}. \quad (12)$$

В процессе выключения ведущей полумуфты совершается работа

$$A_{выкл} = \int_0^{t_{выкл}} M\omega_1 dt \quad (13)$$

Очевидно, что работа  $A_{выкл}$  состоит из полезной работы  $A_{\Pi}$  по преодолению  $M_c$  и работы сил трения  $A_{TP}$  при проскальзывании полумуфт. Кроме того, на преодоление  $M_c$  тратится накопленная кинетическая энергия  $A_J$  вращающихся частей:

$$A_{\Pi} = \int_0^{t_{выкл}} M\omega_2 dt; A_{TP} = \int_0^{t_2} M(\omega_1 - \omega_2) dt; A_J = \frac{J\omega_1^2}{2} \quad (14)$$

Учтем, что на втором этапе уравнение;

$$Jd\omega_2(M_c - M)dt \quad (15)$$

где  $J$  – суммарный момент инерции ведомых частей, приведенных к муфте.

Тогда, принимая коэффициент трения на трущихся поверхностях постоянным, момент трения  $M_{mp}$  в муфте будет изменяться по закону, соответствующему закону изменения силы  $F_{вкл}$ :

$$M_{mp} = M_{max} - k \cdot t, \quad (16)$$

где  $k = M_{max} / t_{вкл}$ .

Максимальный момент  $M_{max}$  равен

$$M_{max} = k_{mp} \cdot R_{cp} \cdot F_{TO} \quad (17)$$

где  $F_{TO} = -F_{np}(\delta_0)$  – усилие прижима при отсутствии тока в обмотке;

$\delta_0$  – остаточный эквивалентный воздушный зазор между якорем и магнитопроводом, величина которого зависит от чистоты обработки сопрягаемых поверхностей и качества сборки фрикционного узла.

### Выводы

Применение автоматизированной системы проведения экспериментальных исследований, включающей в себя роторно-опорный комплекс, систему датчиков и связанный через электромагнитную муфту высокоскоростной электропривод позволит проводить серии экспериментальных исследований в автоматическом режиме по заранее заданным параметрам. Система обладает гибкостью и адаптивными параметрами работы, подходит к широкому спектру экспериментальных установок для исследования роторно-опорных узлов в моменты пуска-останова, в области критических частот. Автоматизация исследований поведения ротора в подшипниках в режиме выбега, а также задание пользователем функций разгона-торможения с возможностью отключения ротора от электропривода значительным образом повышает производительность и функционал экспериментальных стендов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пасынкова И. А. Прецессионное движение ротора в нелинейных подшипниках с радиальным зазором // Международная конференция "Четвертые Окуневские чтения" Симпозиум "Пуанкаре и проблемы нелинейной механики". 22- июня 2004г., Санкт-Петербург: Материалы докладов. Т. I. Теоретическая и прикладная механика. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2005. С. 122–130.
2. Савин Л.А., Соломин О.В. Моделирование роторных систем с опорами жидкостного трения. М.: Машиностроение-1. 2006. 444 с.
3. Белоусов А.И. Теория и проектирование гидродинамических демпферов опор роторов. Самара: Изд-во СНЦ РАИ. 2002. 335 с.
4. Кельзон А.С. Динамика роторов в упругих опорах. М.: Наука. 1982. 280 с.
5. Марцинковский В.А. Бесконтактные уплотнения роторных машин. М.: Машиностроение. 1980. 200с.
6. Ганзбург, Л. Б. Проектирование электромагнитных и магнитных механизмов: справочник / Л. Б. Ганзбург, А. И. Федотов. — Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1980. - 3 64 с.: ил.
7. Добротворский, В. В. Герметичное оборудование с магнитными муфтами / В. В. Добротворский, А. Я. Красильников, Л. Н. Сухоростов // Химическое и нефтяное машиностроение. — 1994. — №6. — С. 39.
8. Добротворский, В. В. Разработка серийных герметичных насосов с магнитной муфтой / В. В. Добротворский, А. Я. Красильников, Л. Н. Сухоросов // Труды СвердНИИХиммаш. Сер. «Оборудование для оснащения технологических производств». — Вып. 2 (66). — Екатеринбург, — 1995. — С. 75 — 81.
9. 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.
10. 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.
11. Кононенко, К. Е. Моделирование динамики работы герметичного турбомеханизма с магнитной муфтой / К. Е. Кононенко, А. Ю. Писаревский // Вестник Воронежского государственного технического университета. — 2008. Т.4. — №3. — С. 91 -94.
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. Красильников, А. Я. Методика выбора магнитной муфты для герметичного насоса / А. Я. Красильников // Химическое и нефтегазовое машиностроение. — 2001. — № 2. — С. 24 — 26.
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. Мизюрин, С. Р. Проектирование магнитно-гистерезисных муфт / С.Р. Мизюрин, М. А. Ермилов. — М.: МАИ, 1971. - 170 с.
16. 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.

17. 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. — С. 108-109.
18. 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.
19. 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.
20. Щетинин, Т. А. Динамика электропривода с индукционными муфтами / Т. А. Щетинин. — М.: Энергия, 1977. - 96 с.

**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

**Серебренников 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 5793@mail.ru

**Серенко Илья Александрович**

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

**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 Сергей Сергеевич**

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

A.V. SYTIN, A.V. GORIN, S.S. VNUKOV, A.D. SEREBRENNIKOV, I. A. SERENKO

**FEATURES OF THE USE OF ELECTROMAGNETIC COUPLINGS  
FOR AUTOMATION OF EXPERIMENTAL STUDIES  
OF ROTARY SYSTEMS**

**Abstract.** The article presents a method for automating experimental studies of rotary systems based on the use of electromagnetic couplings. The use of electromagnetic couplings in the feedback system with the speed sensor allows you to automate a series of experiments on multiple start-stop of the rotor system, as well as during the passage of critical frequencies with the engine switched off within the free run. The design of the electromagnetic friction clutch and the main design dependencies are presented.

**Keywords:** electromagnetic coupling, experiment automation, experimental studies of rotary systems,

**BIBLIOGRAPHY**

1. Pasynkova I. A. Precessional motion of the rotor in nonlinear bearings with radial clearance // International conference "Fourth Okunev Readings" Symposium "Poincaré and problems of nonlinear mechanics". June 22, 2004, St. Petersburg: Materials of reports. T. I. Theoretical and applied mechanics. SPb.: Balt. state tech. Univ., 2005. pp. 122–130.
2. Savin L.A., Solomin O.V. Modeling of rotor systems with fluid friction supports. M.: Mechanical Engineering-1. 2006. 444 p.
3. Belousov A.I. Theory and design of hydrodynamic dampers for rotor supports. Samara: Publishing house SNTs RAI. 2002. 335 p.
- 4 Kelzon A.S. Dynamics of rotors in elastic supports. M.: Science. 1982. 280 p.
5. Martsinkovsky V.A. Non-contact seals for rotary machines. M.: Mechanical engineering. 1980. 200 p.
6. Ganzburg, L. B. Design of electromagnetic and magnetic mechanisms: reference book / L. B. Ganzburg, A. I. Fedotov. — L.: Mechanical engineering. Leningr. department, 1980. -364 p.: ill.
7. Dobrotvorsky, V.V. Sealed equipment with magnetic couplings / V.V. Dobrotvorsky, A.Ya. Krasilnikov, L.N. Sukhorostov // Chemical and petroleum engineering. — 1994. — №6. — P. 39.

8. Dobrotvorsky, V.V. Development of serial sealed pumps with a magnetic coupling / V.V. Dobrotvorsky, A.Ya. Krasilnikov, L.N. Sukhorosov // Proceedings of SverdNIIkhimmash. Ser. "Equipment for equipping technological production." — Vol. 2 (66). - Ekaterinburg, - 1995. - P. 75 - 81.
9. 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.
10. 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.
11. Kononenko, K. E. Modeling the dynamics of a sealed turbo mechanism with a magnetic coupling / K. E. Kononenko, A. Yu. Pisarevsky // Bulletin of the Voronezh State Technical University. - 2008. T.4. - No. 3. — pp. 91 - 94.
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. Krasilnikov, A. Ya. Methodology for choosing a magnetic coupling for a sealed pump / A. Ya. Krasilnikov // Chemical and oil and gas engineering. - 2001. - No. 2. - P. 24 - 26.
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. Mazyurin, S. R. Design of magnetic hysteresis couplings / S. R. Mazyurin, M. A. Ermilov. - M.: MAI, 1971. - 170 p.
16. 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.
17. 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. —P. 108-109.
18. 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.
19. 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.
20. Shchetinin, T. A. Dynamics of an electric drive with induction couplings / T. A. Shchetinin. - M.: Energy, 1977. - 96 p.

**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

**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

**Serebrennikov Artem Dmitrievich**

Orel State University  
Student of the Department Mechatronics, Mechanics and  
Robotics  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: silver57@mail.ru

**Vnukov Sergei Sergeevich**

Orel State University  
Graduate Student of the Department Mechatronics,  
Mechanics and Robotics  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: bibikar@internet.ru

**Serenko Ilya Aleksandrovich**

Orel State University  
Student of the Department Mechatronics, Mechanics and  
Robotics  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: ilyaserenko@gmail.com

В.В. ЗЕЛИНСКИЙ, Е.А. БОРИСОВА, А.В. КАРПОВ, Д.Н. СУЧИЛИН

## ВЛИЯНИЕ ПРИРАБОТОЧНОГО ИЗНАШИВАНИЯ НА ПЛОЩАДЬ КОНТАКТА В ПОДШИПНИКАХ СКОЛЬЖЕНИЯ ТРАКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

**Аннотация.** В статье представлена разработка инженерного метода расчета площади контакта в подшипниках скольжения тракторных двигателей, которая формируется в процессе приработочного изнашивания втулки подшипника. Важность такого расчета обосновывается необходимостью учета в нагрузочных режимах обкатки двигателей текущих значений контактного давления в подшипниках для обеспечения отсутствия в них перегрузки и аварийных задиров при проведении обкатки.

На основе модели образования изношенной лунки в контакте вала с подшипником получена трансцендентная аналитическая функция глубины изношенной лунки, принятой за величину приработочного линейного износа, в зависимости от диаметра вала и относительного зазора в подшипнике. Численная реализация полученной функции позволила получить обратные графические зависимости относительной ширины площадки контакта от величины линейного износа в диапазоне значений конструктивных параметров подшипника, практически используемых в тракторных двигателях. Математическая обработка результатов расчета позволила для ряда частных зависимостей получить общую аппроксимирующую формулу, удобную для инженерных расчетов.

Показано, что действительная площадь контакта в подшипниках скольжения, образующаяся при обкатке после ремонта, существенно меньше номинальной, которую принято использовать в расчетах контактного давления. Полученные закономерности влияния приработочного износа на площадь контакта и, следовательно, давления могут быть использованы при разработке трибологически обоснованных режимов обкатки тракторных двигателей после ремонта.

**Ключевые слова:** площадь контакта, подшипник, давление, приработка, износ, двигатель.

### Введение

Для тракторных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) в последние годы возрастает необходимость в ремонте в связи с ограниченными экономическими возможностями обновления парка машин у большинства предприятий. Известно, что за срок службы тракторов их двигатели подвергаются капитальному ремонту до шести раз [1]. Для достижения требуемых технических показателей отремонтированные двигатели подвергают технологической обкатке. Практикой установлено, что проведение полноценной обкатки также увеличивает межремонтный период в среднем на 30% [1]. Однако, для тракторных ДВС после ремонта, как правило, применяемые режимы обкатки не имеют трибологического обоснования для основных узлов трения. Это нередко приводит к аварийным задирам подшипников скольжения, являющихся наиболее нагруженными трибосопряжениями.

Трибологическим фундаментом усовершенствованных режимов обкатки могут быть принципиальные теоретические и экспериментальные зависимости и взаимосвязи между контактными параметрами подшипников и характеристиками изнашивания, соответствующие процессу приработки сопряжения. В такой постановке режим нагружения при обкатке является функцией «безопасного» напряженного состояния в антифрикционном слое подшипников, то есть, режима изменения контактных давлений. Отдельные результаты в указанном направлении получены в ряде исследований по разработке триботехнологий, повышающих прирабатываемость подшипниковых материалов [4, 5], по изучению закономерностей изменения нагрузочных условий и микротвердости [6], трибологических характеристик и микрографии [7] поверхностей антифрикционных сплавов в период приработки.

Действующее контактное давление при приработке определяется текущим значением площади контакта, представляющую собой сложную функцию ряда геометрических размеров сопряжения и величины линейного износа. В связи с этим расчеты изменяющихся при приработке контактных давлений являются многофакторными. Поэтому создание возможности инженерных расчетов площади контакта, образующейся за счет износа

подшипника, и оценки влияния на ее размеры конструктивных факторов сопряжения является актуальным.

### **Основная часть**

Среднее контактное давление в подшипнике зависит от дуги его контакта с валом, характера распределения фактического давления, а также конструктивных и режимных параметров сопряжения.

В практических расчетах условия работы подшипников идеализируются. Наиболее распространенными упрощениями являются параллельность осей вала и подшипника и прямоугольный характер распределения фактических давлений по дуге контакта. В результате задача определения контактного давления сводится к нахождению площади контакта, которая при известной длине подшипника пропорциональна ширине площадки контакта  $b$  внутри угла контакта  $\phi$  (рисунок 1).

Точное определение ширины площадки контакта  $b$  формально описывается функцией вида:

$$b = f(\phi, d, \psi, N, E_1, E_2, \mu_1, \mu_2) \quad (1)$$

где  $\phi$  – угол контакта;

$d$  – диаметр вала;  $\psi$  – относительный зазор в подшипнике;

$N$  – нагрузка;

$E_1, E_2$  – модули упругости материалов вала и подшипника;

$\mu_1, \mu_2$  – коэффициенты Пуассона для материалов вала и подшипника.

Впервые зависимость, связывающую ширину площадки, угол контакта с нагрузкой и механическими свойствами контактирующих тел, получена Герцем. В дальнейшем решение контактной задачи применительно к цилиндром с близкими диаметрами в более строгой постановке дано в работе [8], где показано, что задача определения указанных параметров контакта состоит в решении сложных интегро-дифференциальных уравнений. В последующих работах уточнены известные решения [9], в том числе с учетом износа [10].

Таким образом, в настоящее время в той или иной форме имеются решения зависимости (1). Однако исходная постановка всех известных контактных задач при внутреннем касании цилиндров применима лишь для сопряжений, не изменяющих свою геометрию в связи с накоплением износа сопряженных тел. Между тем для подшипников скольжения ДВС характерно изменение геометрии контакта в связи с изнашиванием микронеровностей на их поверхности в период технологической приработки. Приработку поверхности за счет изнашивания микронеровностей в пределах их исходной высоты принято называть микроприработкой. Интенсивность микроприработочного изнашивания для ДВС поддерживается достаточно высокой путем повышения нагрузки. Отсюда следует, что за небольшой период времени контактные параметры подшипника значительно изменяются по сравнению с первоначальными. Однако зависимость (1) этого не учитывает.

Процесс микроприработочного изнашивания зависит от многих факторов. Важнейшими из них являются механические свойства материалов сопряжения и нагрузка. Поэтому с допустимым приближением можно считать накопление линейного микроприработочного износа  $\Delta h$  обобщенной функцией механических свойств материалов трущейся пары и внешней нагрузки. Такую функцию в моделировании трибосистем называют трибологическим оператором [9, 11]. Тогда формальное описание зависимости для определения ширины площадки контакта для периода микроприработки примет вид:

$$b = (d, \psi, \Delta h) \quad (2)$$

Исследование закономерностей формирования площади контакта, образующейся за счет изнашивания исходной шероховатой поверхности втулки, в зависимости от конструктивных параметров подшипника проводилось на модели внутреннего контакта двух цилиндров с близкими диаметрами и параллельными осями. Считалось, что нагрузка имеет постоянное направление, а изнашивание происходит только на поверхности втулки, как более мягкой по сравнению с валом. Поверхность вала принималась гладкой, поверхность втулки – шероховатой.

В соответствии с принятой плоской моделью контакта (рисунок 1) вал изнашивает во втулке лунку радиусом  $r$ . Параметры контакта имеют следующие обозначения:  $\Delta h$  – глубина изношенной лунки, равная по величине приработочному линейному износу;  $h, H$  – высота сегментов кругов, отображающих, соответственно, вал и втулку.

В соответствии с принятыми обозначениями:

$$\Delta h = h - H \quad (3)$$

При использовании геометрических соотношений для элементов круга и принятых обозначений, выражение (3) преобразуется к виду:

$$\Delta h = r \left[ 1 - \cos \left( \arcsin \frac{b}{2r} \right) \right] - r(1+\psi) \left[ 1 - \cos \left( \arcsin \left( \frac{b}{(1+\psi)2r} \right) \right) \right] \quad (4)$$

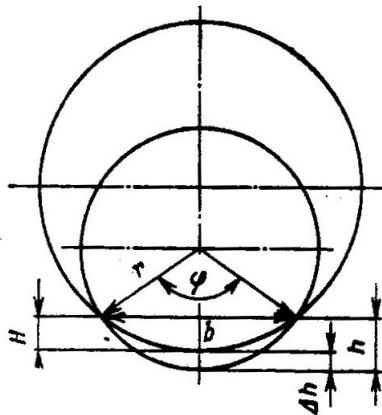


Рисунок 1 - Расчетная плоская модель образования изношенной лунки в контакте вала с подшипником

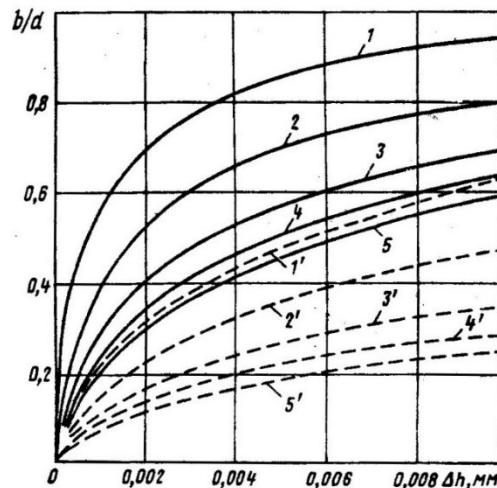


Рисунок 2 - Зависимости относительной ширины площадки контакта от приработочного износа и конструктивных параметров сопряжения:

1, 2, 3, 4, 5 – при  $d = 20$  мм и 1', 2', 3', 4', 5' при  $d = 140$  мм соответственно при значениях  $\psi$ , равных 0,0005; 0,0010; 0,0020; 0,0030; 0,0040

Полученная зависимость универсальна и применима для любых значений аргументов  $b$ ,  $\psi$  и  $r = d/2$ . Однако искомая функция (2) для вычисления ширины площадки в виде  $b = (d, \psi, \Delta h)$  при  $d = \text{const}$  и  $\psi = \text{const}$  является обратной функцией по отношению к полученной зависимости (4). В связи с трансцендентностью последней обратная к ней функция в данной работе получена численным решением зависимости (4) с последующим построением семейства графических зависимостей вида  $b = f(\Delta h)$  при ряде фиксированных значений  $d$  и  $\psi$ . Численное решение и построение графиков проводилось для диаметров вала 20; 60; 100; 140 мм и относительных зазоров 0,0005; 0,0010; 0,0020; 0,0030; 0,0040. Из опыта известно, что износ при технологической приработке находится в пределах высоты первоначальной шероховатости [11]. Поэтому наибольшее значение микроприработочного износа принималось равным 0,01 мм, что соответствует высоте микровыступов реальной исходной шероховатости вкладышей большинства подшипников скольжения.

В инженерной практике номинальное контактное давление обычно определяют отношением нагрузки  $N$  к площади диаметрального сечения шейки вала, принимая тем самым, что угол контакта равен  $180^\circ$ , а номинальная ширина площадки  $b_n$  равна диаметру вала ( $b_n = d$ ). Поэтому влияние износа и конструктивных параметров подшипника  $d$  и  $\psi$  на закономерности изменения при микроприработке действительной ширины площадки  $b$  целесообразно оценивать по изменению ее отношения к номинальной ширине площадки. То есть оценивать по изменению относительной ширины площадки  $b/d$ .

На рисунке 2 представлены примеры обратных графических зависимостей вида  $b/d = f(\Delta h)$  (для валов диаметром 20 мм и 140 мм при ряде применяемых в практике ремонта значениями относительного зазора  $\psi$ ), полученных в результате численного решения зависимости (4). Для определения величины  $b$  (при заданных  $d$ ,  $\psi$  и  $\Delta h$ ) следует значение  $b/d$ , полученное по одному из графиков на рисунке 2, умножить на  $d$ .

В результате анализа графических зависимостей установлено, что на повышение ширины площадки  $b$  увеличение линейного износа  $\Delta h$  оказывает весьма существенное влияние, особенно в начале приработочного изнашивания. На заключительных этапах микроприработки это влияние ослабевает.

Выявлено также, что интенсивность увеличения относительной ширины площадки снижается с увеличением диаметра и относительного зазора. На основании изложенного

окончательные площади контакта, образующиеся в результате микроприработки, значительно меньше номинальных (таблица 1). Так для подшипников с относительным зазором  $\psi = 0,002$  и диаметрами 60, 100 и 140 мм действительная площадка отличается от номинальной соответственно в 1,96; 2,38; 2,78 раза, при относительном зазоре  $\psi = 0,003$  – в 2,32; 2,85; 3,45 раза и при  $\psi = 0,004$  – в 2,78; 3,22; 4,0 раза. В практике проведения технологической приработки приведенные результаты не учитываются, что может быть одной из причин аварийных задиров подшипников.

Достаточно большие площади контакта в результате изнашивания обеспечивают относительные зазоры  $\psi = 0,0005$  и  $\psi = 0,0010$  при малых диаметрах валов (20...30 мм). Однако в тракторных ДВС даже небольшой мощности шейки коленчатых валов составляют от 50 мм и выше. Кроме того, согласно рекомендациям [12] для тракторных двигателей после капитального ремонта, в связи с невысокой точностью шлифования шеек валов и уровнем качества сборки, малые относительные зазоры не принято назначать.

Также анализ графических зависимостей (рисунок 2) показал, что увеличение ширины площадки контакта  $b$  за пределами высоты исходной шероховатости незначительно, особенно для подшипников небольшого диаметра. Уменьшение относительного зазора слабо повышает параметр  $b$  при дальнейшем увеличении износа.

Таблица 1 – Окончательные значения относительной ширины площадки контакта, полученной в результате микроприработки

Относительный зазор $\psi$	Относительная ширина площадки контакта $b/d$ при износе $\Delta h = 0,01$ мм и величинах $d$ , мм			
	20	60	100	140
0,0005	0,95	0,80	0,70	0,64
0,0010	0,80	0,66	0,55	0,48
0,0020	0,70	0,51	0,42	0,36
0,0030	0,65	0,43	0,35	0,29
0,0040	0,60	0,36	0,31	0,25

Анализ графических зависимостей (рисунок 2) показал, что закономерности увеличения ширины площадки  $b$  за счет микроприработки для всех сочетаний  $d$  и  $\psi$  близки к степенным функциям. Математическая обработка графических зависимостей позволила получить для определения ширины площадки в зависимости от конструктивных параметров подшипника и величины износа общую аппроксимирующую формулу:

$$b = \frac{1,12d^{0,55}}{\psi^{0,47}} \Delta h^{0,41} \quad (5)$$

Проверка формулы (5) с использованием точных графических зависимостей на рисунке 2, полученных на основе численного решения зависимости (4), показала, что относительная погрешность в определении  $b$  по данной формуле не превышает 5% в области больших и средних значений  $d$  и  $\psi$ . При малых  $d$  и  $\psi$  погрешность не превышает 10%. С данной погрешностью формула применима в диапазоне значений для  $d = 20...140$  мм, для  $\Delta h = 0...0,010$  мм и для  $\psi = 0,0005...0,0040$ .

Анализ формулы (5) показывает, что в условиях ремонта увеличение величины зазора после шлифования шеек коленчатых валов, широкий диапазон рекомендуемых величин зазоров и их определение по эмпирическим формулам [12] могут привести к существенному уменьшению ширины контакта.

Практически зависимость (5) может служить не только для облегчения расчетов при определении текущей ширины площадки контакта, но и облегчения выбора относительного зазора с учетом приработочного износа.

### Заключение

Выполненная работа, несмотря на принятые упрощения, позволила установить принципиальные закономерности влияния величины приработочного износа вкладышей подшипников на формирование действительной площади контакта при технологической приработке. Для тракторных двигателей после ремонта действительная площадь контакта может быть более, чем вдвое меньше номинальной. Полученные результаты позволяют прогнозировать характер роста «безопасного» нагружения ДВС при технологической обкатке после ремонта.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимохин, С.В. Совершенствование технологии и средств холодной обкатки автотракторных ДВС / С.В Тимохин, И.С. Королев // Нива Поволжья. – 2015, № 1 (34). С. 61-65.
2. Синев, А.Н. О совершенствовании технологии обкатки двигателей внутреннего сгорания / А.Н. Синев, А.С. Яшин // Современные научно-исследовательские технологии. -2014. - № 5-2.- С. 76.
3. Королев, А.Е. Влияние режима обкатки на показатели работы двигателей / Эпоха науки. – 2020. № 23. – С. 61-65.
4. V.V. Zelinsky, D.N. Suchilin Development of bases and evaluation capabilities of the new tribotechnology for plain bearings // Applied Mechanics and Materials, 2015, Volum (756), P. 70-74.
5. Зелинский, В. В. Обоснование и разработка новой триботехнологии для антифрикционных материалов / В.В. Зелинский, Д.Н. Сучилин // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3; URL: www.science-education.ru/117-13666 (дата обращения: 30.06.2014).
6. Зелинский, В. В. Модифицирование материалов для подшипников скольжения / В.В. Зелинский, Д.Н. Сучилин // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности №2, 2013. С. 54-61.
7. Цуканов, И.Ю. Трибологические характеристики и микрогеометрия поверхностей антифрикционных сплавов в период приработки / И.Ю. Цуканов, О.О. Щербакова, А.М. Мезрин, И.В. Шкалей, Т.И. Муравьева // Трение и износ. -2020, Т. 41, № 1. С. 19-26.
8. Усов, П.П. Определение зоны контакта и контактных напряжений при внутреннем соприкосновении цилиндрических тел. / Машиноведение. 1981. -№6. С. 75-81.
9. 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.- 576 с.
10. Чернец, М.В. К вопросу о расчете контактных давлений в металло полимерных подшипниках скольжения при изнашивании / М.В. Чернец, А.А. Корниенко, М.И. Пашечко, Ю.М. Чернец, А.И. Духота // Трение и износ. – 2021, Т. 42, № 5. С. 539-551.
11. Справочник по триботехнике / Под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. В 3 т. Т.1. Теоретические основы. – М.: Машиностроение, 1989. – 400 с.
12. Стефановский, А.Б. Обоснование величин зазоров в подшипниках скольжения автотракторных двигателей с помощью регрессионных зависимостей / Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. Вып. 3. С. 385-393.

**Зелинский Виктор Васильевич**

Муромский институт (филиал)  
ФГБОУ ВО «Владимирский государственный  
университет  
имени Александра Григорьевича и Николая  
Григорьевича  
Столетовых», г. Муром  
Доцент кафедры технологии машиностроения  
602264, г. Муром, ул. Орловская, 23  
E-mail: Selvik46@yandex.ru

**Карпов Алексей Владимирович**

Муромский институт (филиал)  
ФГБОУ ВО «Владимирский государственный  
университет  
имени Александра Григорьевича и Николая  
Григорьевича  
Столетовых», г. Муром  
Доцент кафедры технологии машиностроения  
602264, г. Муром, ул. Орловская, 23  
E-mail: krash75@mail.ru

**Борисова Екатерина Александровна**

Муромский институт (филиал)  
ФГБОУ ВО «Владимирский государственный  
университет  
имени Александра Григорьевича и Николая  
Григорьевича  
Столетовых», г. Муром  
Доцент кафедры технологии машиностроения  
602264, г. Муром, ул. Орловская, 23  
E-mail: Catherine.b2011@yandex.ru

**Сучилин Дмитрий Николаевич**

АО «ПО Муроммашзавод»,  
602264, г. Муром, Карабаровское шоссе., 56  
Технический директор  
E-mail: Suchilind@yandex.ru

---

V.V. ZELINSKIY, E.A. BORISOVA, A.V. KARPOV, D.N. SUCHILIN

## INFLUENCE OF RUNNING-IN WEAR ON THE CONTACT AREA IN SLIDING BEARINGS OF TRACTOR ENGINES

**Abstract.** The article presents the development of an engineering method for calculating the contact area in sliding bearings of tractor engines, which is formed during the running-in wear of the bearing sleeve. The importance of such a calculation is justified by the need to take into account the current values of contact pressure in the bearings in the load modes of engine running-in to ensure that they are not overloaded and there are no emergency scuffing during running-in.

Based on the model of the formation of a worn crater in contact between a shaft and a bearing, a transcendental analytical function of the depth of the worn crater is obtained, taken as the amount of running-in linear wear, depending on the diameter of the shaft and the relative clearance in the bearing. Numerical implementation of the obtained function made it possible to obtain inverse graphical dependences of the relative width of the contact area on the magnitude of linear wear in the range of bearing design parameters practically used in tractor engines. Mathematical processing of the calculation results made it possible to obtain a general approximating formula for a number of particular dependencies, convenient for engineering calculations.

It is shown that the actual contact area in sliding bearings, formed during running-in after repair, is significantly less than the nominal one, which is usually used in calculating contact pressure. The obtained patterns of the influence of running-in wear on the contact area and, consequently, pressure can be used in the development of tribologically based running-in regimes for tractor engines after repair.

**Keywords:** contact area, bearing, pressure, running-in, wear, engine.

## BIBLIOGRAPHY

1. Timohin, S.V. Sovershenstvovanie tehnologii i sredstv holodnoy obkatki avtotraktornyh DVS / S.V. Timohin, I.S. Korolev // Niva Povolgya. – 2015, № 1 (34). S. 61-65.
2. Sinev, A.N. O sovershenstvovanii tehnologii obkatki dvigateley vnutrennego sgoraniay / A.N. Sinev, A.S. Yashin // Sovremennye naukoemkie tehnologii. -2014. - № 5-2.- S. 76.
3. Korolev, A.E. Vliyanie rezhma obkatki na pokqzateli raboty dvigateley / Epoha nauki. – 2020. № 23. – S. 61-65.
4. V.V. Zelinsky, D.N. Suchilin Development of bases and evaluation capabilities of the new tribotehnology for plain bearings // Applied Mechanics and Materials, 2015, Volum (756), P. 70-74.
5. Zelinskiy, V.V. Obosnovanie i razrabotka novoy tribotahnologii dlya antifriktsionnyh materialov / V.V. Zelinskiy, D.N. Suchilin // Sovremennye problemi nauki i obrazovaniya. – 2014. – № 3; URL: www.science-education.ru/117-13666 (data obrashcheniya: 30.06.2014).
6. Zelinskiy, V.V. Modifitsirovaniye materialov dlya podshipnikov skolzheniya / V.V. Zelinskiy, D.N. Suchilin // Mashinostroenie i bezopasnost zhiznedeyatelnosti №2, 2013. S. 54-61.
7. Tsukanov, I.Yu. Tribologicheskie harakteristiki i mikrogeometriya poverhnostey antifriktsionnyh splavov v period prirabotki / I.Yu. Tsukanov, O.O. Shcherbakova, A.M. Mezrin, I.V. Shkaley, T.I. Muraveva // Trenie i iznos. - 2020, T. 41, № 1. S. 19-26.
8. Usov, P.P. Opredelenie zony kontakta i kontaktnyh napryazheniy pri vnutrennem soprikosnovenii tsilindricheskikh tel. / Mashinovedenie. 1981. -№6. S. 75-81.
9. Trenie, iznos i smazka (tribologiya i tribotehnika) / A.V. Chichinadze, E.M. Berliner, E.D.Braun i dr.; Pod obshch. red. A.V. Chichinadze. - M.: Mashinostroenie. 2003. - 576 s.
10. Chernets, M.V. K voprosu o raschete kontaktnyh davleniy v metallopolimernyh podshipnikah skolzheniya pri iznashivanii / M.V. Chernets, A.A. Kornienko, M.I. Pashechko, Yu.M. Chernets, A.I. Duhota // Trenie i iznos. – 2021, T. 42, № 5. S. 539-551.
11. Spravochnik po tribotehnike / Pod obshch. Red. M. Hebdy, A.V.. A.V. Chichinadze. V 3 t. T.1. Teoreticheskie osnovy. – M.: Mashinostroenie, 1989. – 400 s.
12. Stefanovskiy, A.B. Obosnovanie velichin zazorov v podshipnikah skolzheniya avtotraktirnyh dvigateley s pomoshchyu regressionnyh zavisimostey / Izvestiya TulGU. Tehnicheskie nauki. 2019. Vyp. 3. S. 385-393.

### Zelinskiy Viktor Vasilevich

Murom institute (branch)

FGBOU VO «Vladimir State University named after Alexander Grigorievich and Nikolai Grigorievich Stoletovs»

Docent of chair technology of machine building  
602264, Murom, Orlovskaya street, 23

E-mail: Selvik46@yandex.ru

### Karpov Alexei Vladimirovich

Murom institute (branch)

FGBOU VO «Vladimir State University named after Alexander Grigorievich and Nikolai Grigorievich Stoletovs»

Docent of chair technology of machine building  
602264, Murom, Orlovskaya street, 23

E-mail: krash75@mail.ru

### Borisova Ekaterina Aleksandrovna

Murom institute (branch)

FGBOU VO «Vladimir State University named after Alexander Grigorievich and Nikolai Grigorievich Stoletovs»

Docent of chair technology of machine building  
602264, Murom, Orlovskaya street, 23

E-mail: Catherine.b2011@yandex.ru

### Suchilin Dmitriy Nikolaevich

AO «PO Murommashzavod»,

602264, Murom, Karacharovskoe Shosse, 56

Technical Director

E-mail: Suchilind@yandex.ru

Д.А. АБАКАРОВА, К.К. НАСТЕПАНИН, Р.Н. ПОЛЯКОВ

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕНИЯ И НАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ КЛИНО-ВИНТОВОЙ ПЕРЕДАЧИ

**Аннотация.** В статье представлена математическая модель определения характеристик трения и силомоментных параметров клино-винтовой передачи. Описана экспериментальная установка и подход к определению коэффициента трения такого вида передач. Обосновано, что совмещение двух типов передач с эффектом самоторможения даёт ещё больший эффект по данному параметру, а комбинирование параметров проектируемых передач позволяет добиться сверхвысокой точности и силовой характеристики выходного движения.

**Ключевые слова:** клиновая передача, передача винт-гайка, самоторможение, коэффициент трения.

### Введение

Регулировочные механические передачи являются важным элементом многих машин и механизмов. Они позволяют адаптировать оборудование к различным условиям работы и требованиям процесса, что делает их незаменимыми в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства. Помимо требований высокой точности выходного движения, как правило, к ним предъявляются требования силового замыкания звеньев без возможности смещения на всех режимах работы технологического оборудования.

На рисунке 1 представлены различные варианты регулирования зазора с помощью клиньев и винта. Зазор в направляющих устраниют смещением планок или клиньев (1) с помощью винтов (2), фиксацию установленного положения планки или клина производят винтом 3 (контргайкой) [1].

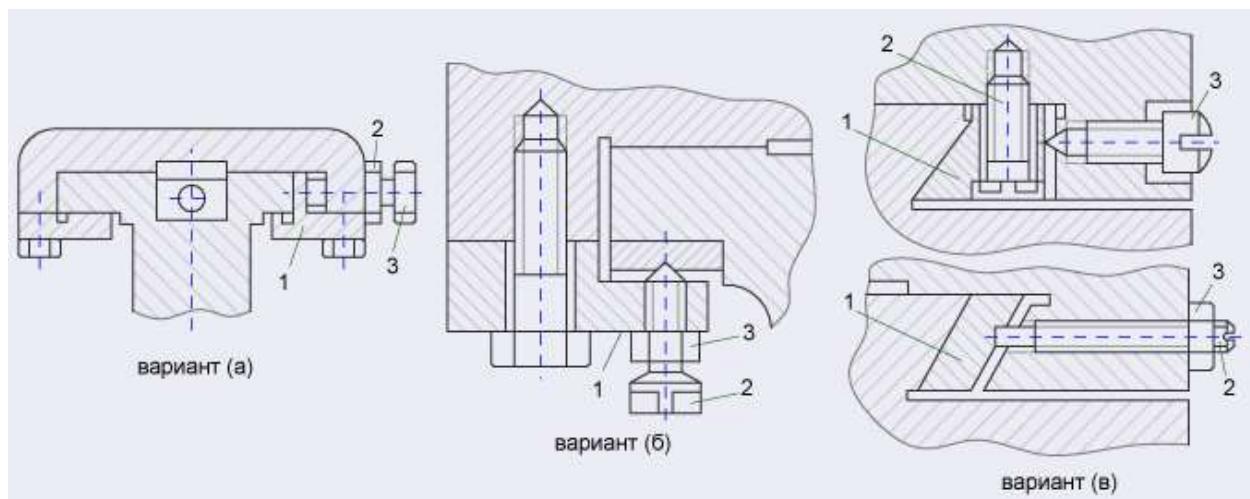


Рисунок 1 – Механизм регулирования зазора в направляющих

По сути данный регулирующий механизм является прототипом гибридной клино-винтовой передачи, рассматриваемой как объект исследования в данной работе. Одной из сфер применения регулировочных механизмов являются адаптивные подшипники скольжения, которые позволяют изменять параметры опорного узла в режиме реального времени, не останавливая роторную машину [2,3]. Такие конструкторские решения являются основой концепции адаптивной эксплуатации роторных машин, например турбогенераторов, суть которой заключается в том, что бы при достижении подшипником предельного износа скорректировать рабочий зазор с учётом этого дефекта и дать возможность стабильной работы

роторной машины ещё некоторое время пока эксплуатант подготовит все необходимые мероприятия по выводу роторной машины в ремонт.

Таким образом, объектом исследования является гибридная передача винт-гайка скольжения, в которой неподвижное основание, являющиеся одновременно опорной поверхностью и обеспечивающей свободное вращение винта, одна из ответных поверхностей выполнена в виде клина, а гайка выполнена с ответной клиновой поверхностью, сопряженной с поверхностью основания (рисунок 2).

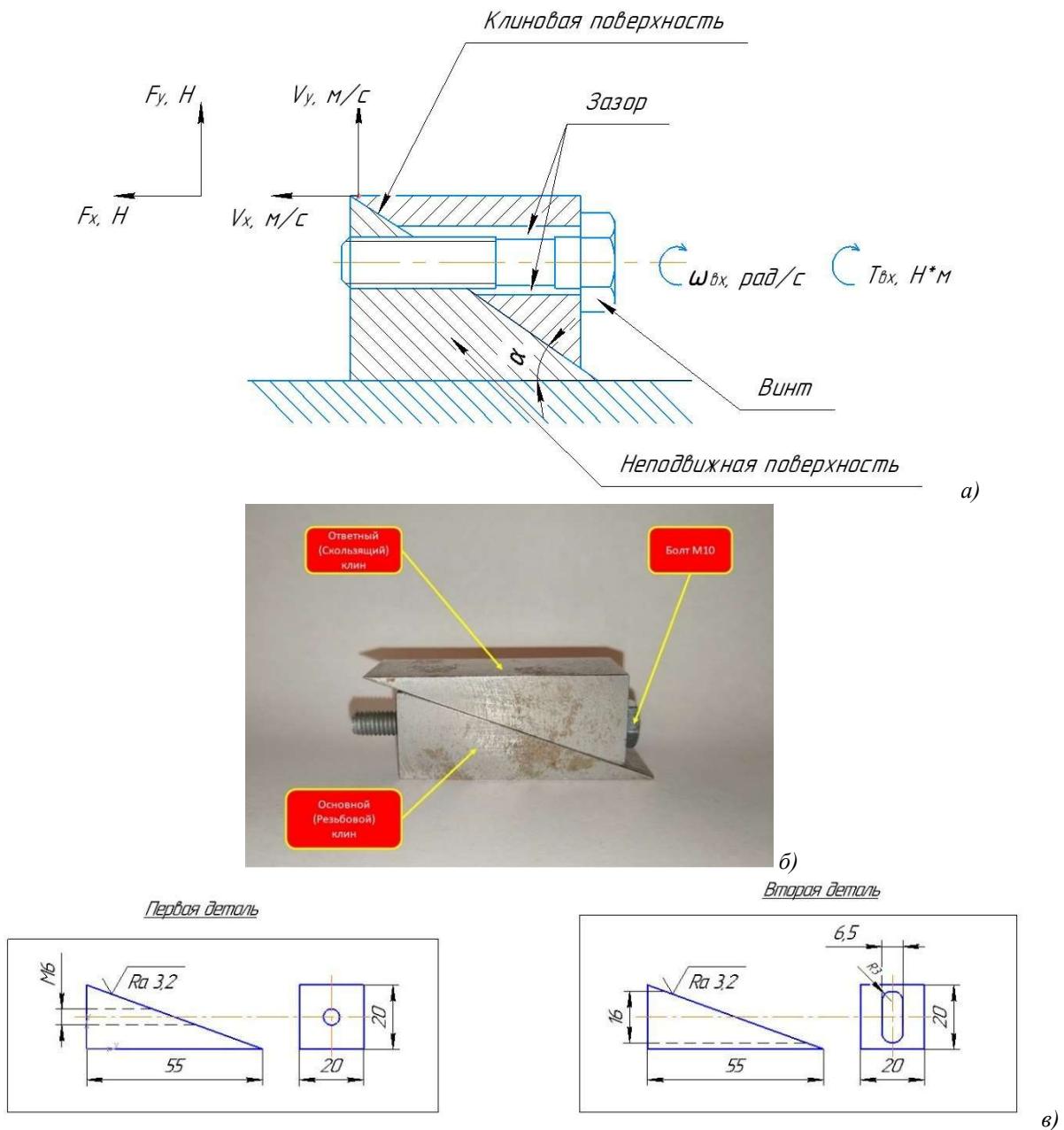


Рисунок 2 – Клино-винтовая передача:

- а) схема передачи; б) экспериментальный образец;  
в) основные геометрические и технологические параметры экспериментального образца

Принцип работы клино-винтовой заключается в следующем. При вращении винта с входными параметрами  $\omega_{\text{вх}}$ ,  $T_{\text{вх}}$  винт совершает вращательное и поступательное движение. Торцевая часть головки винта толкает подвижный клин. На выходе имеем два вида поступательного движения в горизонтальном и вертикальном направлениях с параметрами

$V_x^{\text{вых}}, V_y^{\text{вых}}, F_x^{\text{вых}}, F_y^{\text{вых}}$ , что даёт возможность проектирования передачи для разделения параметров на выходе. По другому говоря, передача имеет две степени свободы.

Объект исследования имеет следующие параметры: передача винт-гайка – метрическая резьба M6, шаг резьбы 1мм, клиновая передача: угол клина  $20^\circ$ . Подвижный клин исполнялся в двух видах материалах: Ст40, ABS-пластик.

### Конструкция экспериментальной установки

Целью эксперимента является определение коэффициентов трения в составляющих элементах клино-винтовой передачи: трение в между витками резьбы винта и резьбы гайки совмещённой с неподвижным клином, трение между торцем винта и торцем подвижного клина, трение между поверхностями клиньев.

Общий вид экспериментального стенда представлен на рисунке 3. Установка состоит из основания, на котором установлен универсальный зажим для закрепления неподвижного клина и всей клиновинтовой передачи в целом. Вращение приводного винта осуществляется через динамометрическую отвёртку Tohnichi FTD20CN-S с диапазоном измерения момента затяжки от 0,03 до 0,2 Н · м. Нагружение осуществлялось путём размещения тарированных грузов на верхней плоскости подвижного клина в диапазоне от 9,8 до 68,6 Н. Одновременно измерялся ход подвижного клина в вертикальном направлении. Перемещение в горизонтальном направлении не контролировалось.

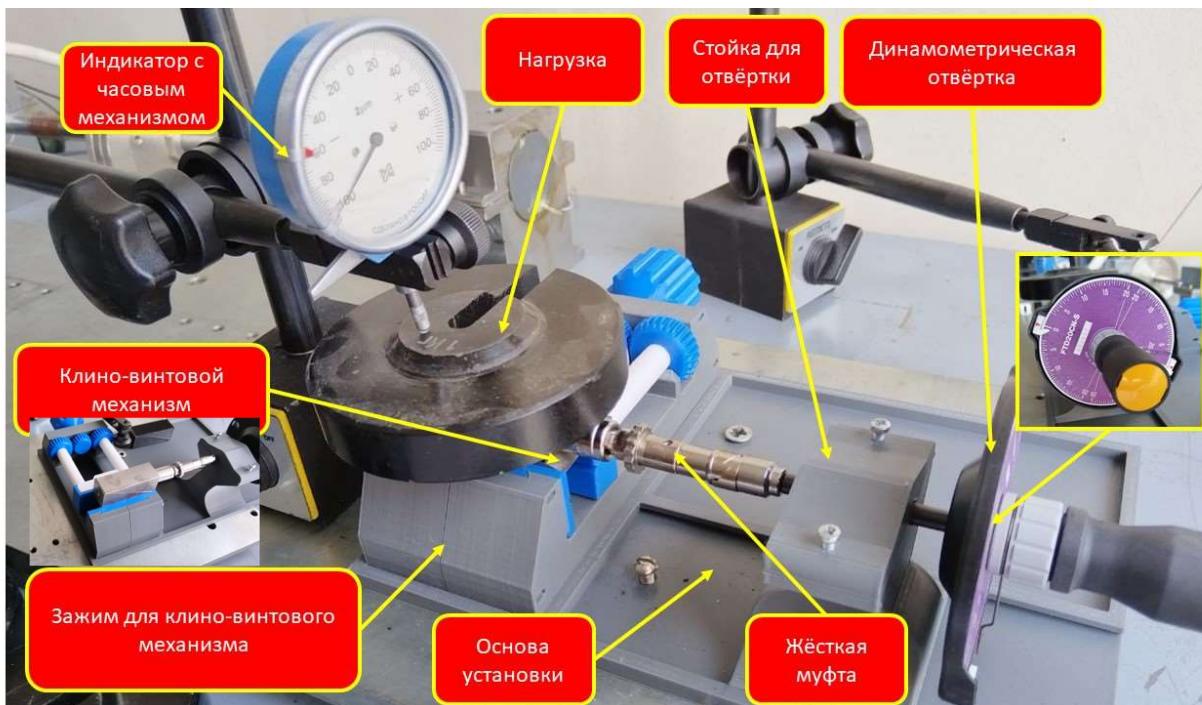


Рисунок 3 – Экспериментальный стенд для исследования гибридных коэффициентов трения

### Результаты эксперимента

В ходе эксперимента совершалось вращение динамометрической отверткой до достижения вертикального перемещения 0,5 мм и фиксировался максимальный крутящий момент  $T_{\text{кр}}$  при установившемся движении. На каждое сочетание параметров проводилось 10 экспериментов, обработка проводилась стандартными методами математической статистики. Результаты эксперимента представлены в таблице 1.

### Определение характеристик трения

Математическая модель клино-винтовой передачи базируется на сопряжении силомоментных, кинематических и геометрических параметров основных формул, описывающих каждую передачу по отдельности. Основы расчёта клиновой и передачи винт-гайка заложены в [4,5].

Таблица 1 – Результаты эксперимента Сталь по Стали

Материал	Сталь по стали						
Уровень нагрузки	1	2	3	4	5	6	7
Нагрузка, Н	9,8	19,6	29,4	39,2	49	58,8	68,6
Момент завинчивания, Н · м	0,0393	0,0513	0,0589	0,0581	0,0885	0,0978	0,1276
Материал	Сталь по ABS пластику						
Нагрузка, Н	9,8	19,6	29,4	39,2	49	58,8	68,6
Момент завинчивания, Н · м	0,0353	0,0366	0,0434	0,0473	0,0532	0,0660	0,0765

Условием сопряжения является уравнения баланса сил, а именно, что осевая сила в винте идёт на преодоление действия силы веса, силы трения между подвижным и неподвижным клиньями и дополнительной силы трения, возникающей в контактах подвижных деталей с неподвижными

$$F_0 = G \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \varphi) + F_{\text{тр}}, \quad (1)$$

где  $F_0$  – осевая сила в винте;

$G \operatorname{tg}(\alpha + \varphi)$  – проекция вертикальной силы, создаваемой при перемещении подвижного клина, здесь  $G$  – вес поднимаемого груза,  $\alpha$  – угол клина,  $\varphi$  – угол трения клина,  $\varphi = \operatorname{arctg} f_{\text{кл}}$ ,  $f_{\text{кл}}$  – коэффициент трения для пары материалов подвижного и неподвижного клиньев;

$F_{\text{тр}}$  – силы трения между другими подвижным и неподвижным поверхностями, конструкция экспериментальной установки выполнена таким образом, что  $F_{\text{тр}} = 0$ , в том числе и отсутствует трение на торце головки болта.

Требуемый момент завинчивания  $T_3$  для создания осевой силы  $F_0$

$$T_3 = F_0 \frac{d_2}{2} \cdot \operatorname{tg}(\psi + \varphi'), \quad (2)$$

где  $d_2$  – средний диаметр резьбы;

$\psi$  – угол подъёма винтовой линии,  $\psi = t/(\pi d_2)$ , здесь  $t$  – шаг резьбы;

$\varphi'$  – приведённый угол трения в резьбе,  $\varphi' = \operatorname{arctg} f_p'$ ,  $f_p'$  – приведённый коэффициент трения, для метрической резьбы  $f_p' = 1,15 f_p$ , здесь  $f_p$  – коэффициент трения для пары материалов передачи винт-гайка.

Подставив (1) в (2) и решив систему уравнения относительно неизвестного коэффициента трения между подвижным и неподвижным клиньями получаем

$$f_{\text{кл}} = \frac{AB - \operatorname{tg} \alpha}{1 + AB \cdot \operatorname{tg} \alpha}, \quad (3)$$

$$\text{где } A = \frac{2T_3}{d_2 G}; B = \frac{1 - \frac{t}{\pi d_2} f_p'}{\frac{t}{\pi d_2} + f_p'}$$

Параметры комбинируемых передач: угол клиньев  $\alpha = 20^\circ$ , средний диаметр резьбы  $d_2 = 5,351$  мм, шаг резьбы  $t = 1$  мм, коэффициент трения для пары материалов передачи винт-гайка (сталь по стали, упругий контакт, Ra12,5) принят согласно [6]  $f_p = 0,765$ .

Результаты вычислений коэффициента трения для каждого шага нагрузления представлены на рисунках 4, 5.

Из графиков отчётливо следует, что коэффициент трения пары клиньев, выполненных из стали и пластика меньше, чем для пары трения «сталь-сталь». Из этого можно сформулировать один из критериев проектирования подобного типа передач, что без ущерба общей грузоподъёмности передачи можно повысить её энергоэффективность путём выполнения ведомого клина из пластика или покрытия трущейся плоскости антифрикционным материалом. При этом необходимо понимать, что из пластика должен быть

выполнен именно ведомый клин, так ведущий клин выполняет роль гайки и при нарезке резьбы в пластиковой детали возможны технологические проблемы из-за малой прочности поверхностного слоя.

Большие значения коэффициентов трения в области малых нагрузок можно объяснить большей погрешностью показаний динамометрической отвёртки в области начальных значений пределов измерения.

Вариативность коэффициентов трения при различных нагрузках является обычным явлением, описанным, например в [7,8].

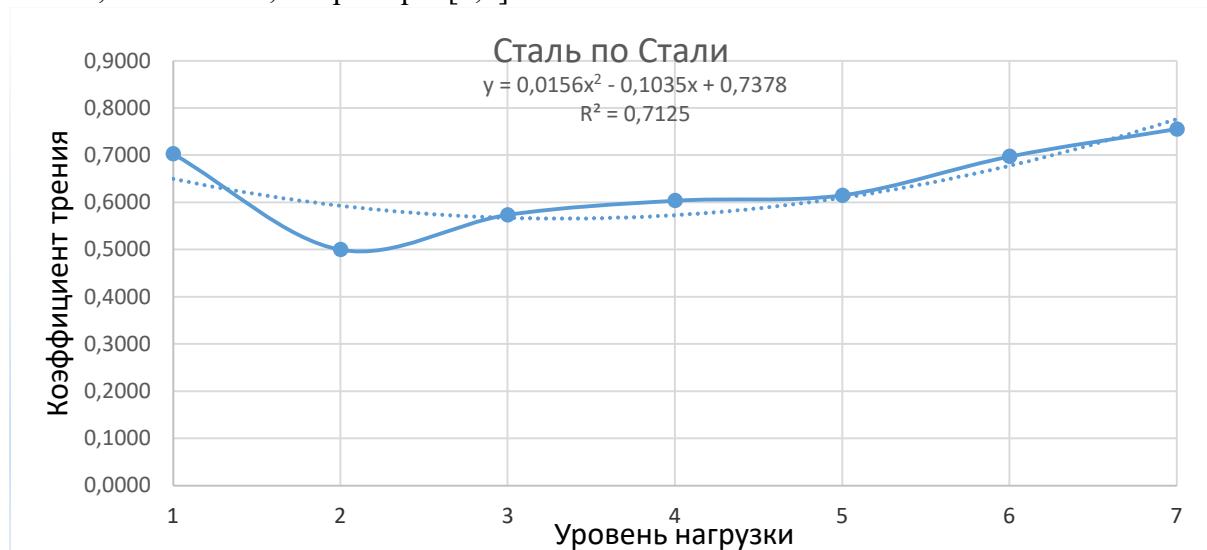


Рисунок 4 – Коэффициент трения «Сталь по Стали»

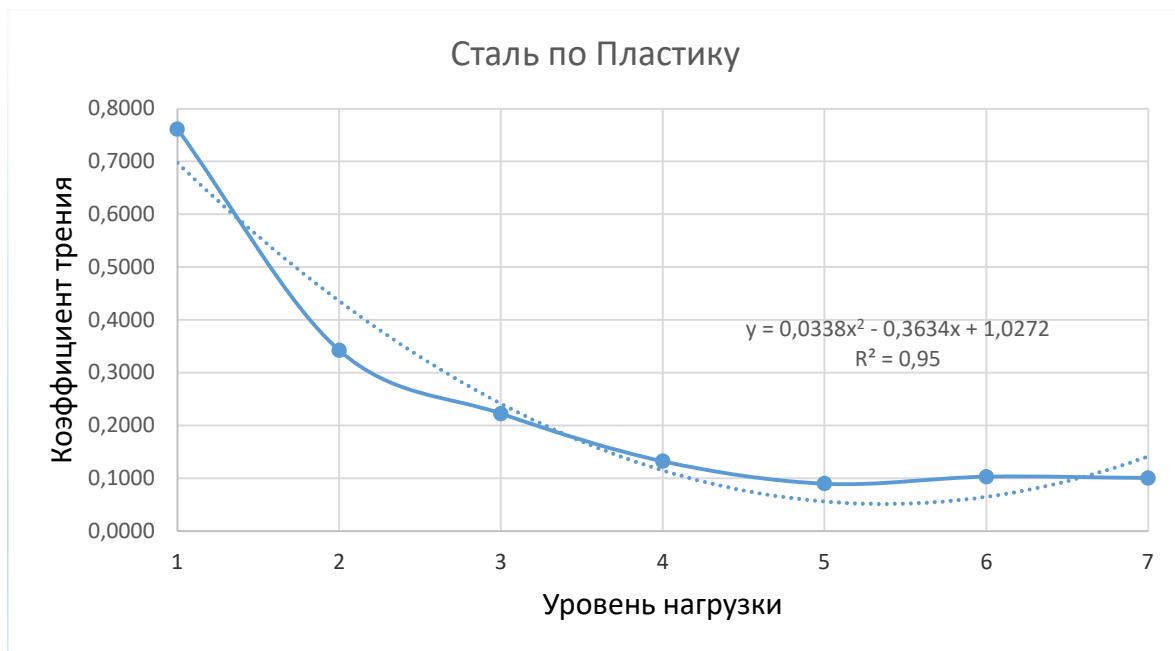


Рисунок 5 – Коэффициент трения «Сталь по Стали»

## Выводы

Гибридная клино-винтовая передача обладает рядом преимуществ по сравнению с одиночным использованием клиновой или передачи винт-гайка для позиционирования каких-либо элементов точного оборудования, радиолокационных антенн, телескопов и т.п.

1) более точное позиционирование в зависимости от выходного движения за счёт мультипликативного передаточного отношения;

2) возможность получения двух выходных точных движений, параметры которых можно заложить в очень широком диапазоне при проектировании параметров клино-винтовой передачи;

3) точность выходного движения, так в исследуемой передаче: горизонтальное движение 1 мм на 1 оборот винта, вертикальное движение 0,364 мм на 1 оборот винта и, если принять контролируемый на входе угол поворота винта  $5^\circ$ , то на выходе вертикального движения получаем перемещение 0,005 мм, что является показателем точной системы;

4) достижение сверхвысоких показателей точности выходного движения нанометрового диапазона за счёт варьирования применения резьб с шагами менее 1 мм, дифференциальной схемы передачи винт-гайка, меньших углов клиновой передачи;

5) совмещение двух типов самотормозящих передач может быть также использовано в особо ответственных регулировочных и позиционирующих механизмах, которые не допускают отклонения установленной позиции ни при каких внешних воздействиях, так как наблюдается мультиплексный эффект самоторможения, что видно по высоким значениям экспериментальных коэффициентов трения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вереина Л.И., Краснов М.М. Конструкции и наладка токарных станков. – М.: ИНФРА-М, 2021 г. – 480 с.
2. A. Chasalevris and F. Dohnal Improving stability and operation of turbine rotors using adjustable journal bearings / A. Chasalevris and F. Dohnal // Tribol. Int.–2016. vol. 104, pp. 369 –382, doi: 10.1016/j.triboint.2016.06.022.
3. Поляков Р.Н., Настепанин К.К., Абакарова Д.А., Бондаренко М.Э. Экспериментальная установка для исследования адаптивных подшипников скольжения / Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2023. – № 6(362). – С. 126-136.
4. Иванов М.Н. Детали машин. Учебник для вузов. Изд.6-е.М.:Высшая школа, 1998.
5. Решетов Д.Н. Детали машин. Учебник для вузов. Изд.4-е.М.:Машиностроение, 1989.
6. Керопян А.М., Вержанский П.М., Мостаков В.А., Басов Р.К. Зависимость коэффициента трения в зоне контакта системы колесо-рельс от шероховатости взаимодействующих поверхностей / Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – №11. – С. 80-89.
7. Измайлов В.В., Новоселова М.В. К вопросу о зависимости коэффициента трения от давления и скорости / Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2019. – №2. – С.5-13.
8. Мусохранов М.В., Калмыков В.В., Малышев Е.Н., Зенкин Н.В. Энергия поверхностного слоя металлов как инструмент воздействия на величину коэффициента трения / Фундаментальные исследования. Технические науки. – 2015. – №2. – С. 251-254.
9. Измерение коэффициентов трения 11 типов пластика при разных температурах // 3D Today. URL: <https://3dtoday.ru/blogs/shusy/plastic-olympics-downhill> (дата обращения: 07.05.2024).

**Абакарова Диана Рамазановна**  
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С.  
Тургенева»,  
Аспирант  
302020, г.Орёл, Наугорское  
шоссе, 29  
Тел. +79919333103  
E-mail: dinovka@mail.ru

**Настепанин Кирилл Константинович**  
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С.  
Тургенева», г. Орел  
Студент магистратуры  
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 29  
Тел. +79534136923  
E-mail: nastepanin02@mail.ru

**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

---

D.R. ABAKAROVA, K.K. NASTEPANIN, R.N. POLYAKOV

## EXPERIMENTAL STUDY OF FRICTION AND LOAD CAPACITY OF A HYBRID WEDGE-SCREW GEAR

**Abstract.** The article presents a mathematical model for determining the friction characteristics and force-torque parameters of a wedge-screw gear. An experimental setup and approach to determining the friction coefficient of

*this type of gear are described. It is substantiated that the combination of two types of gears with a self-braking effect gives an even greater effect in this parameter, and the combination of the parameters of the designed gears makes it possible to achieve ultra-high accuracy and power characteristics of the output movement.*

**Keywords:** wedge gear, screw-nut gear, self-braking, friction coefficient.

## BIBLIOGRAPHY

1. Vereina L.I., Krasnov M.M. Designs and adjustment of lathes. – M.: INFRA-M, 2021 – 480 p.
2. A. Chasalevris and F. Dohnal Improving stability and operation of turbine rotors using adjustable journal bearings / A. Chasalevris and F. Dohnal // Tribol. Int.–2016. vol. 104, pp. 369 –382, doi: 10.1016/j.triboint.2016.06.022.
3. Polyakov R.N., Nastepanin K.K., Abakarova D.A., Bondarenko M.E. Experimental setup for the study of adaptive sliding bearings / Fundamental and applied problems of engineering and technology. – 2023. – No. 6(362). – pp. 126-136.
4. Ivanov M.N. Machine parts. Textbook for universities. Ed. 6th. M.: Higher School, 1998.
5. Reshetov D.N. Machine parts. Textbook for universities. Ed. 4th. M.: Mechanical Engineering, 1989.
6. Keropyan A.M., Verzhansky P.M., Mostakov V.A., Basov R.K. Dependence of the friction coefficient in the contact zone of the wheel-rail system on the roughness of the interacting surfaces / Mining Information and Analytical Bulletin. – 2016. – No. 11. – P. 80-89.
7. Izmailov V.V., Novoselova M.V. On the issue of the dependence of the friction coefficient on pressure and speed / Bulletin of Tver State Technical University. Series: Technical Sciences. – 2019. – No. 2. – P.5-13.
8. Musokhranov M.V., Kalmykov V.V., Malyshev E.N., Zenkin N.V. Energy of the surface layer of metals as a tool for influencing the value of the friction coefficient / Fundamental research. Technical science. – 2015. – No. 2. – pp. 251-254.
9. Measuring friction coefficients of 11 types of plastic at different temperatures // 3D Today. URL: <https://3dtoday.ru/blogs/shusy/plastic-olympics-downhill> (access date: 05/07/2024).

**Abakarova Diana Ramazanovna**

Orel State University named after I.S. Turgenev  
Graduate student  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
Ph.: +79919333103  
E-mail: dinovka@mail.ru

**Nastepanin Kirill Konstantinovich**

Orel State University named after I.S. Turgenev  
Master's student  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
Tel. +79534136923  
E-mail: nastepanin02@mail.ru

**Polyakov Roman Nikolaevich**

Orel State University named after I.S. Turgenev  
doctor of technical Sciences,  
associate professor of the department  
mechatronics, mechanics and  
robotics  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse,  
29  
Ph.: +79038819381  
E-mail: romanpolak@mail.ru

© Д.А. Абакарова, К.К. Настепанин, Р.Н. Поляков, 2024

А.Ю. РОДИЧЕВ, ХУ ДЖИГАН, М.И. ПРУДНИКОВ, ХАН ЮЛЕЙ,  
Л.А. САВИН, И.В. РОДИЧЕВА

## ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ С ТВЕРДЫМИ АНТИФРИКЦИОННЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

**Аннотация.** Повышение триботехнических свойств поверхностей трения различных по назначению, геометрии контакта, условиям смазывания является актуальной задачей и поиск новых технологических решений требует адекватной оценки на основании экспериментальных исследований. В статье проанализированы подходы к исследованию антифрикционных твердосмазочных покрытий. На примерах показана реализация некоторых из них. Представлены результаты экспериментальных исследований пар трения «сталь – антифрикционное покрытие MODENGY», проведены сравнения и сделаны выводы.

**Ключевые слова:** трибологические испытания, твердые антифрикционные покрытия, коэффициент трения.

### Введение

Трибологические испытания являются важной частью исследований в области машиностроения и материаловедения. Они позволяют оценить характеристики трения и износа материалов, используемых в узлах трения, таких как подшипники скольжения. Испытание трибосопряжений включает в себя комплекс мероприятий, направленных на оценку их работоспособности и долговечности в условиях реального использования. Это критически важно для обеспечения надежности и эффективности работы машин и механизмов. Основные этапы испытания трибосопряжений заключаются в:

- подготовке образцов (очистка, обезжиривание и приведение образцов к требуемым размерам и форме);
- сборке испытательной установки (установка образцов в держатели и закрепление их в соответствии с требованиями методики испытаний);
- выборе режима испытаний (определение нагрузки, скорости движения образцов, температуры и других параметров, влияющих на процесс трения и износа);
- проведение испытаний (запуск испытательной установки и контроль параметров процесса трения и износа);
- анализе результатов (обработка полученных данных, оценка износа образцов, определение коэффициентов трения и других характеристик процесса);
- оформление отчета (составление отчета о проведенных испытаниях, включающего результаты анализа, графики, таблицы и выводы).

Испытания могут осуществляться как в лаборатории, так и в условиях реальной эксплуатации. Они позволяют выявить слабые места в конструкции трибосопряжений, определить оптимальные условия их работы и разработать рекомендации по повышению их надежности и долговечности.

При проведении экспериментов по изучению трибологических характеристик необходимо принимать во внимание геометрию контактирующих поверхностей, характер движения элементов трибопары, наличие и тип смазочного материала, а также ряд других параметров [1]. Методику проведения трибологических экспериментов систематизировал А. В. Чичинадзе, И.В. Крагельский и ряд иностранных ученых [2 - 6]. Для измерения силы или крутящего момента трения применяют различные типы динамометров, такие как тензометрические, пружинные, маятниковые, пьезоэлектрические и индукционные датчики. Износ оценивается по изменению массы и линейных размеров образцов, состоянию поверхностей трения или размеру контрольных отверстий на поверхности [7]. Температуру как внутри материала, так и на его поверхности можно измерять как контактными (с использованием термопар), так и бесконтактными (пиromетрами) методами. В ходе трибологических испытаний также определяют количество, размер и форму частиц износа, а

также химическую эволюцию поверхностных слоёв образцов и смазок, включая наличие плёнок перенесённого материала, трещин, пор [8].

Для проведения трибологических исследований используют машины трения, с помощью которых получают трибологические характеристики исследуемых объектов, для выявления их влияния на динамические свойства машин и их компонентов. Машины трения можно классифицировать по различным критериям. Например, по назначению они делятся на машины для испытания материалов на трение и износ, для определения триботехнических характеристик смазочных материалов, для исследования процессов трения и изнашивания. Кроме того, существуют специализированные машины трения, предназначенные для конкретных задач, например, для испытания материалов в условиях высоких температур или агрессивных сред. Таким образом, изучение трения и износа материалов представляет собой сложную задачу, требующую знаний из различных областей.

### Основная часть

Трибологические испытания являются сложным процессом и от правильности и соблюдений инструкций и рекомендаций по его выполнению зависят результаты эксперимента.

Первым таким правилом, относящимся к категории оборудования, является то, что при использовании триботехнических машин и стендов важно строго следовать инструкциям производителя. Со временем результаты измерений могут немного измениться из-за вибрации и ползучести материала датчиков силы. Необходимо регулярно калибровать измерительные системы (тахометры, динамометры, моментометры, рычажно-гравитационные системы) в статическом режиме, используя эталонные средства измерения и специальное оборудование. Погрешность измерения силы трения в статическом режиме обычно составляет от 1 до 5 % от измеряемой величины или от верхнего предела измерений.

Ко второму правилу относятся требования, предъявляемые к покрытиям, суть которых сводится к испытанию их в условиях, приближенных к условиям эксплуатации, то есть согласно требованию производителя.

Опираясь на проводимые ранее исследования процессов трения в узлах с твердосмазочными покрытиями [9, 10] можно выделить четыре основные схемы, представленные на рисунке 1.

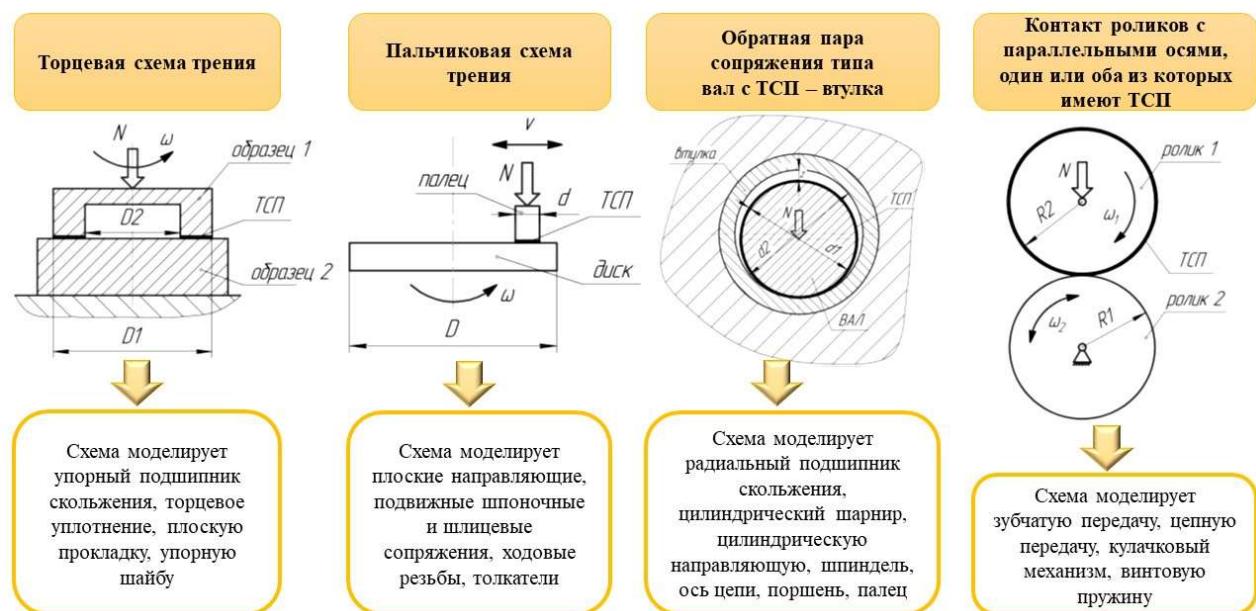


Рисунок 1 – Схемы трибологических испытаний с использованием твердосмазочных антифрикционных покрытий

На данный момент в России множество видов твердых смазочных материалов: от универсальных до специализированных. Они помогают уменьшить трение и износ в

различном оборудовании. Твердые антифрикционные покрытия — это специальные материалы, которые создают на поверхности деталей сухую плёнку, прочно сцепленную с основой. Эта плёнка снижает трение и износ в течение всего срока службы оборудования. Такие покрытия производят из твёрдых смазочных веществ, связующих материалов и растворителей. В отличие от традиционных смазок, антифрикционные покрытия обычно требуют нагрева для полного затвердевания. По сравнению с обычными смазками, твёрдые материалы обладают лучшими эксплуатационными характеристиками. Покрытия обеспечивают длительную смазку и защиту от коррозии, не требуют обновления, устойчивы к экстремально высоким и низким температурам, не вытесняются под воздействием высокого давления, эффективны при высоких скоростях скольжения, не накапливают мелкие частицы, не испаряются и не выделяют токсичных веществ. В России одним из производителей таких материалов является компания «Моденжи». Её специалисты разработали десятки антифрикционных твердосмазочных покрытий под брендом MODENGY. Эти покрытия широко применяются в различных отраслях промышленности как в России, так и за её пределами и успешно заменяют импортные аналоги. Каждое разработанное покрытие подвергается трибологическим испытаниям. Одним из таких испытаний, направленных на определение триботехнических свойств твердосмазочного покрытия, является испытание по стандарту ASTM G99, схема проведения — «сфера-диск», при трении скольжения. Метод, описанный в стандарте, применяется в международной практике для определения параметров трения и износа. В компании «Моденжи» испытания проводятся на машине трения (рисунок 2) оснащённой автоматизированной системой управления и регистрации данных NI LabVIEW.

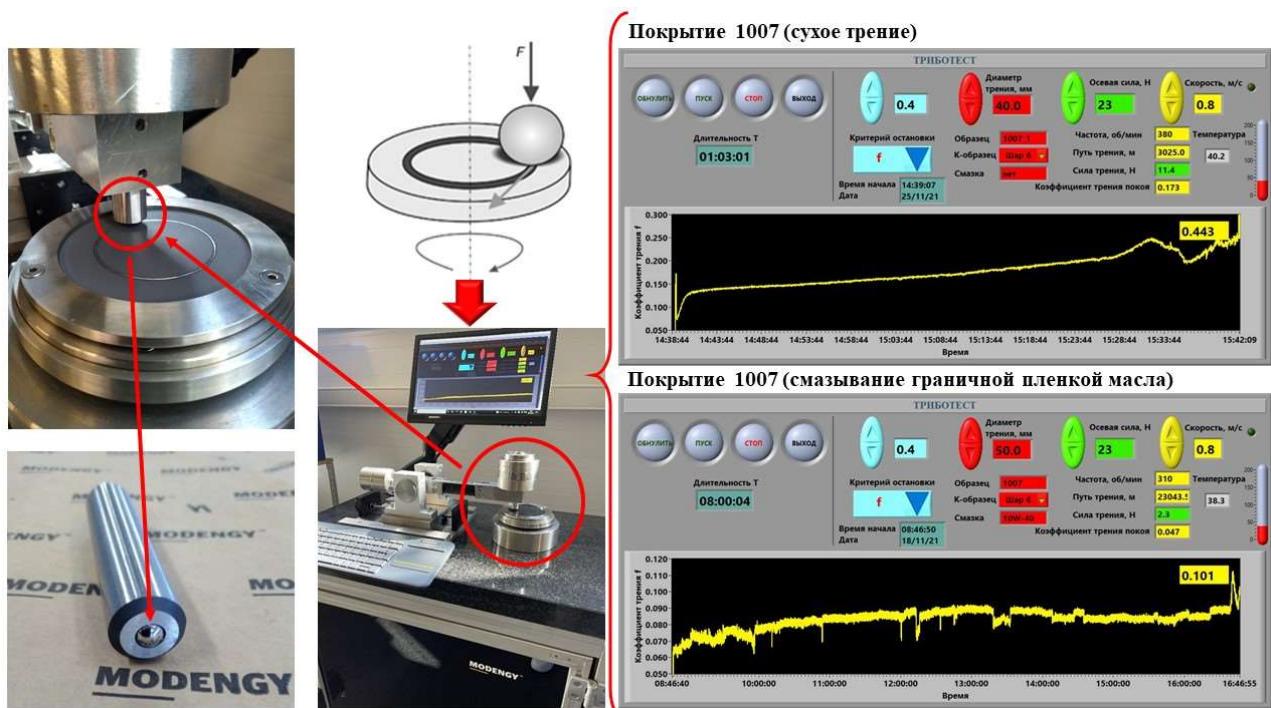


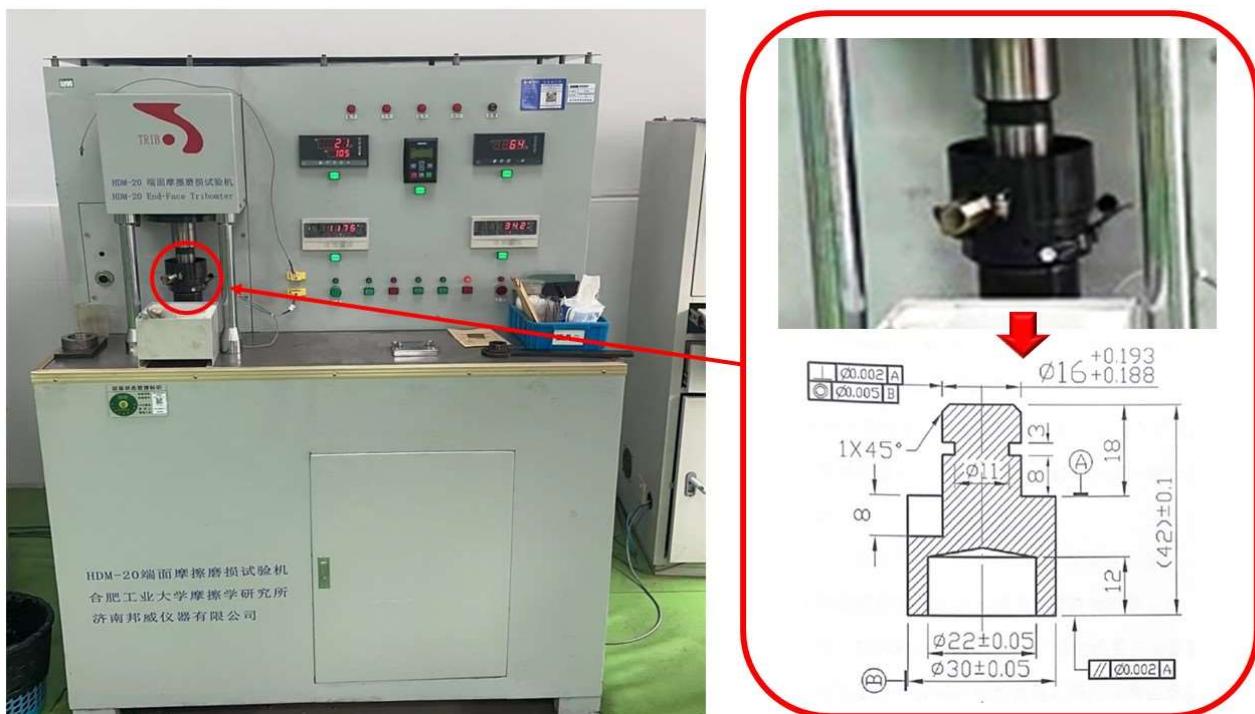
Рисунок 2 – Трибологические испытания твердого антифрикционного покрытия по стандарту ASTM G99

Геометрия пары трения и материалы, представленные на рисунке 2: сферический индентор диаметром 6,35 мм по ГОСТ 3722, образец в виде диска диаметром 80 мм и толщиной 0,8 мм с нанесенным твердосмазочным покрытием толщиной  $25\pm 5$  мкм. Материал сферического индентора: сталь ШХ15 ГОСТ 801. Материал образца: сталь AISI 430. Наименование твердосмазочного покрытия: MODENGY 1007.

Испытания осуществляются следующим образом: сферический индентор устанавливается в держатель и прижимается к врачающемуся с частотой  $n$  образцу в виде диска заданной силой  $F$ , при этом в процессе испытаний непрерывно регистрируется значение силы трения скольжения и автоматически вычисляется значение коэффициента трения с

выводом на экран в виде графика. Испытания ведутся в предельном по сочетанию контактного давления и скорости скольжения, в режиме до истирания твердосмазочного покрытия на образце, которое проявляется в виде скачкообразного увеличения коэффициента трения ( $f \geq 0,4$ ). При этом фиксируется количество циклов вращения диска  $N$  до истирания покрытия.

Для подтверждения заявленных характеристик повышения износостойкости пар трения с твердыми антифрикционными покрытиями компании «Моденжи» был подготовлен и проведён эксперимент на базе триботехнической лаборатории завода ZOB (КНР, ЗАО «Чжэцзянская компания по производству безмасляных подшипников «Шуанфей») [11]. На рисунке 3 представлен общий вид экспериментальной установки для исследования триботехнических характеристик HDM-20, которая относится к классу торцевых трибометров для исследования пар трения в контакте по торцевой схеме «плоскость – плоскость».



*Рисунок 3 – Трибологические испытания твердого антифрикционного покрытия на экспериментальной установке HDM-20 трения по торцевой схеме «плоскость – плоскость»*

Контрольно-измерительная система ЭУ установленная на экспериментальной установке HDM-20 позволяет управлять и контролировать следующие параметры:

- нагрузка на образец — от 0 до 19 600 Н;
- скорость вращения — от 0 до 2 800 об/мин;
- крутящий момент — от 0 до 40 Нм при частоте вращения от 150 до 1 500 об/мин;
- крутящий момент — от 0 до 20 Нм при частоте вращения от 1 500 до 2 800 об/мин;
- температура — до 300 °C (точность измерения температуры ±1,0 °C);
- форма и размеры образцов: круг, наружный диаметр менее 30 мм, внутренний диаметр менее 25 мм; квадрат, 41x41 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.

Под параметры экспериментальной установки были изготовлены образцы пластин с двумя видами покрытия MODENGY 1007 и MODENGY 1006.

Покрытие MODENGY 1006 (антифрикционное твердосмазочное покрытие на основе дисульфида молибдена и графита) используется в подшипниках скольжения в насосах и

клапанах, плунжерных парах гидрооборудования; золотниках и клапанах в распределительных и управляющих устройствах; зубчатых зацеплениях силовых редукторов в энергетике; деталях ДВС (поршнях, подшипниках скольжения), эксплуатируемых в экстремальных условиях. Диапазон рабочих температур: -70 ... +315 °C (кратковременно до +450 °C). Температура полимеризации: +200 °C в течении 20 минут [12].

Покрытие MODENGY 1007 (антифрикционное твердосмазочное покрытие на основе графита) используется в узлах трения автотехники: юбках поршней двигателей, шлицевых соединениях, вкладышах коленчатых и распределительных валов; в качестве дополнительной антиаварийной смазки для узлов, смазанных маслом или пластичным смазочным материалом; поршнях компрессоров, насосов, пневматических и гидравлических приводов; подшипниках скольжения погружных электроцентробежных нефтяных насосов; поверхностях скольжения оборудования по переработке полимеров (запаечных матрицах, калибраторах, охлаждающих столах); направляющих скольжения фасово-упаковочных аппаратов; роторах винтовых компрессоров; тяжелонагруженных узлах трения скольжения, подверженных воздействию нагрева, влаги и пыли – там, где неэффективны масла и пластичные смазки. Диапазон рабочих температур: -50 ... +350 °C. Температура полимеризации: +200 °C в течении 20 минут [13].

Испытания проводились в режиме сухого трения. На рисунке 4 представлены фотографии образцов после испытаний.

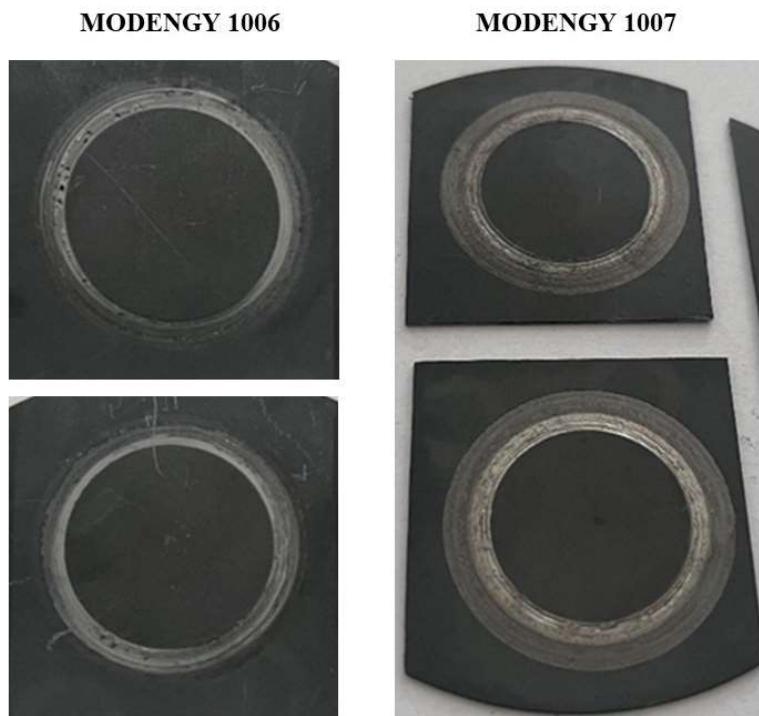


Рисунок 4 – Образцы с твердосмазочным антифрикционным покрытием после проведения испытаний

По результатам испытаний твердых антифрикционных покрытий MODENGY 1006 и MODENGY 1007, мы можем увидеть уменьшение коэффициента сухого трения по сравнению с базовыми материалами пар трения (рисунок 5). Например, для пары трения «сталь – сталь» коэффициент сухого трения 0,30...0,40 [14], 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 твердым антифрикционным покрытием MODENGY удалось добиться значения коэффициента сухого трения 0,093...0,103 (для покрытия MODENGY 1006) и 0,128...0,18 (для покрытия MODENGY 1007).

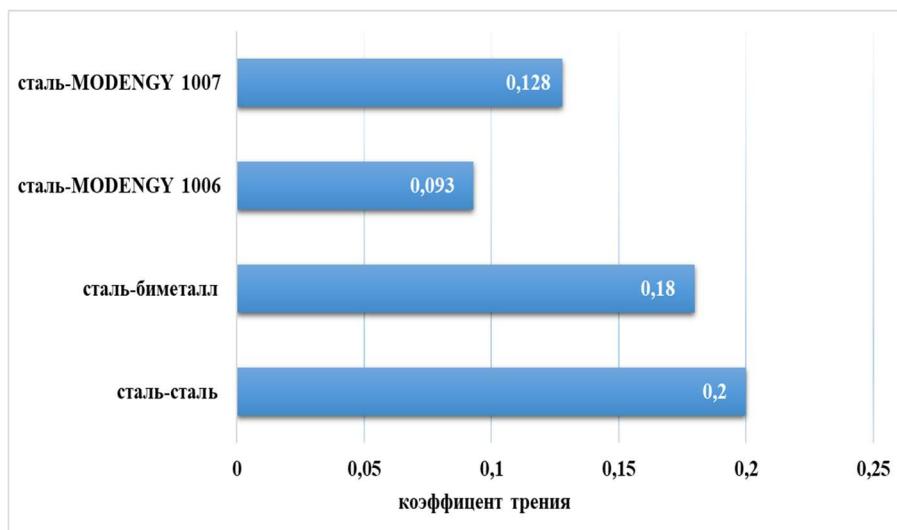


Рисунок 5 – Результаты исследования образцов

Несмотря, на хорошие результаты, полученные при испытании твердых антифрикционных покрытий стоит отметить, что покрытие MODENGY 1007 предназначено для работы в смазочном слое. Поэтому, как было сказано ранее, для подбора покрытий нужно довериться специалистам и четко следовать технологии нанесения так как у различных покрытий она может отличаться.

### Заключение

История развития твёрдых антифрикционных покрытий началась в XX веке. На данный момент антифрикционные покрытия нашли свое применение во многих отраслях науки и техники, за счет возможности их использования фактически на любых конструкционных материалах, таких как: бронза, латунь, медь, алюминий, низколегированные и высоколегированные стали, титан и чугун, нержавеющие и немагнитные стали, пластики и твёрдая резина и т.д.

Использование твердых антифрикционных покрытий в процессе изготовления, технического обслуживания и ремонта машин узлов и агрегатов позволит:

- снизить коэффициент трения;
- защитить от коррозии;
- повысить противозадирные свойства;
- сохранить геометрию деталей;
- обеспечить локальное нанесение;
- обеспечить ресурсное смазывание;
- повысить ресурс при работе в запыленных средах.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перепелкина С. Ю., Коваленко П. П., Печенко Р. В., Нуждин К. А. Методика исследования трибологических характеристик материалов на машине трения // Изв. вузов. Приборостроение. 2016, Т. 59, № 8. С. 636—640.
2. А.В. Чичинадзе и др. Основы трибологии (трение, износ, смазка). Машиностроение, Москва, 2001.
3. И.В. Крагельский, Машиностроение трения и износа, Москва, 1968.
4. И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов, Основы расчета в машиностроении трения и износа, Москва, 1977.
5. F.B. Carlson, A. Robertsson, R. Johansson, Modeling and identification of position and temperature dependent friction phenomena without temperature sensing, IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems,, art. no. 7353797, (2015) December, pp. 3045-3051.
6. T. Santos, P. Vilaça, J. Dos Santos, L. Quintino, A new NDT system for micro imperfections detection, Application to FSW Welding in the World, 53 (SPEC. ISSUE), (2009), pp. 361-366.

7. N.K. Myshkin, M.I. Pertokovec, Friction, Lubricants. Physical Basics and Technical Applications of Tribology, PhysMathLit, 2007.
8. K.G. Budinski, Guide to Friction, Wear and Erosion Testing, ASTM International, West Cochocker, PA, 2007.
9. Сутягин О.В. Контакт шероховатых тел с твёрдосмазочными покрытиями: монография / О.В. Сутягин, А.Н. Болотов, М.В. Васильев – Тверь: Тверской государственный технический университет, 2014 – 124 с.
10. Мединцев С. В. Разработка метода обеспечения работоспособности винтовых сопряжений с твердосмазочными покрытиями: автореферат дис. на соиск. уч. степ. кандидата технических наук: специальность <Машиноведение, системы приводов и детали машин> / Мединцев Станислав Викторович; [Место защиты: С.-Петербург. гос. политехн. ун-т]. - Тверь, 2018. - 16 с.: ил.
11. ЗАО «Чжэцзянская компания по производству безмасляных подшипников «Шуанфей».[Электронный ресурс]. 2024. URL: <http://www.zoben.com> (дата обращения 20.02.2024).
12. MODENGY. [Электронный ресурс]. 2024. URL: <https://modengy.ru/catalog/antifriktsionnye-tverdosmazochnye-pokrytiya/1006/> (дата обращения 17.04.2024).
13. MODENGY. [Электронный ресурс]. 2024. URL: <https://modengy.ru/catalog/antifriktsionnye-tverdosmazochnye-pokrytiya/1007/> (дата обращения 17.04.2024).
14. Ануьев, В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3-х т./ В. И. Ануьев. – 8-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2001. Т. 1. – 2001. – 920 с.

**Родичев Алексей Юрьевич**

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

**Ху Джиган**

ЗАО «Чжэцзянская компания по производству  
безмасляных подшипников «Шуанфей»,  
заместитель генерального директора  
КНР, провинция Чжэцзян, г.Цзясин, округ Цзяшань,  
улица Хунвэй, 18  
E-mail: info@sf-bearing.com

**Прудников Максим Иванович**

ООО "Моденжи"  
кандидат технических наук, генеральный директор  
241029, г. Брянск, ул. Олега Кошевого, строение 34В  
E-mail: m.prudnikov@modengy.ru

**Хан Юлей**

ЗАО «Чжэцзянская компания по производству  
безмасляных подшипников «Шуанфей»,  
инженер  
КНР, провинция Чжэцзян, г.Цзясин, округ Цзяшань,  
улица Хунвэй, 18  
E-mail: info@sf-bearing.com

**Савин Леонид Алексеевич**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»,  
доктор техн. наук, профессор кафедры мехатроники,  
механики и робототехники  
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 29  
E-mail: savin3257@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: irina.rodicheva.rodicheva@yandex.ru

---

A.YU. RODICHEV, HU ZHIGANG, M.I. PRUDNIKOV, HANG YULEI,  
L.A. SAVIN, I.V. RODICHEVA

## TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF FRICTION SURFACES WITH HARD ANTI-FRICTION COATINGS

**Abstract.** Increasing the tribotechnical properties of friction surfaces that differ in purpose, 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 analyzes approaches to the study of antifriction solid lubricant coatings. The examples show the implementation of some of them. The results of experimental studies of friction pairs "steel – MODENGY antifriction coating" are presented, comparisons are made and conclusions are drawn.

**Keywords:** tribological tests, hard antifriction coatings, friction coefficient.

## BIBLIOGRAPHY

1. Perepelkina S. Yu., Kovalenko P. P., Pechenko R. V., Nuzhdin K. A. Methodology for studying the tribological characteristics of materials on a friction machine // Izv. universities Instrumentation. 2016, T. 59, No. 8. P. 636-640.

2. A.V. Chichinadze et al. Fundamentals of tribology (friction, wear, lubrication). Mechanical Engineering, Moscow, 2001.
3. I.V. Kragelsky, Mechanical engineering of friction and wear, Moscow, 1968.
4. I.V. Kragelsky, M.N. Dobychin, V.S. Kombalov, Fundamentals of calculations in mechanical engineering of friction and wear, Moscow, 1977.
- 5.F.B. Carlson, A. Robertsson, R. Johansson, Modeling and identification of position and temperature dependent friction phenomena without temperature sensing, IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems,, art. no. 7353797, (2015) December, pp. 3045-3051.
6. T. Santos, P. Vilaça, J. Dos Santos, L. Quintino, A new NDT system for micro imperfections detection, Application to FSW Welding in the World, 53 (SPEC. ISSUE), (2009), pp. 361-366.
7. N.K. Myshkin, M.I. Pertokovec, Friction, Lubricants. Physical Basics and Technical Applications of Tribology, PhysMathLit, 2007.
8. K.G. Budinski, Guide to Friction, Wear and Erosion Testing, ASTM International, West Cochcker, PA, 2007.
9. Sutyagin O.V. Contact of rough bodies with solid lubricant coatings: monograph / O.V. Sutyagin, A.N. Bolotov, M.V. Vasiliev - Tver: Tver State Technical University, 2014 - 124 p.
10. Medintsev S.V. Development of a method for ensuring the operability of screw joints with solid lubricant coatings: abstract of thesis. for the job application uch. step. Candidate of Technical Sciences: specialty "Mechanical science, drive systems and machine parts" / Medintsev Stanislav Viktorovich; [Place of protection: St. Petersburg. state Polytechnic University]. - Tver, 2018. - 16 p.: ill.
11. Zhejiang SF Oilless Bearing Co., Ltd. [Electronic resource]. 2024. URL: <http://www.zobcn.com> (accessed 02/20/2024).
12. MODENGY. [Electronic resource]. 2024. URL: <https://modengy.ru/catalog/antifriktsionnye-tverdosmazochnye-pokrytiya/1006/> (accessed 17/04/2024).
13. MODENGY. [Electronic resource]. 2024. URL: <https://modengy.ru/catalog/antifriktsionnye-tverdosmazochnye-pokrytiya/1007/> (accessed 17/04/2024).
14. Anuriev, V.I. Handbook of mechanical engineering designer: in 3 volumes / V. I. Anuriev. – 8th ed., revised. and additional – M.: Mechanical Engineering, 2001.T. 1. – 2001. – 920 p.

**Rodichev Alexey Yuryevich**

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

**Prudnikov Maxim Ivanovich**

LLC MODENGY  
Candidate of Technical Sciences, General Director  
241029, Bryansk, st. Oleg Koshevoy, building 34B  
E-mail: m.prudnikov@modengy.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  
E-mail: savin3257@mail.ru

**Hu Zhigang**

Zhejiang SF Oilless Bearing Co., Ltd.  
deputy general manager  
China, Zhejiang Province, Jiaxing City, Jiashan County,  
North Hongwei Road, №18  
E-mail: info@sf-bearing.com

**Hang Yulei**

Zhejiang SF Oilless Bearing Co., Ltd.  
engineer  
China, Zhejiang Province, Jiaxing City, Jiashan County,  
North Hongwei Road, №18  
E-mail: info@sf-bearing.com

**Rodicheva Irina Vladimirovna**

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

© А.Ю. Родичев, Ху Джиган, М.И. Прудников, Хан Юлей, Л.А. Савин, И.В. Родичева, 2024

В.В. ПОЗДНЯКОВ, Р.Н. ПОЛЯКОВ, О.В. СОЛОМИН

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРЕЧНЯ КРИТИЧЕСКИХ УЗЛОВ НАСОСОВ ПУТЁМ АНАЛИЗА КАЧЕСТВА ЭКСПЛУАТАЦИИ В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

**Аннотация.** Статья посвящена анализу качества эксплуатации насосов в реальных условиях на примере насоса шестеренного НМШ32-10. Приведены основные технические характеристики насоса, статистика продаж и отказов насоса. Концепция предиктивной эксплуатации предполагает выявление критических узлов технического оборудования, относительно которых необходимо строить модели определения остаточного ресурса. Предложена методика анализа основных причин отказов основных узлов насоса, выявлены наиболее проблемные узлы. Проведено исследование причин отказов подшипников и предложена концепция программно-аппаратного комплекса мониторинга технического состояния и предиктивного анализа остаточного ресурса подшипников по фактическим условиям эксплуатации.

**Ключевые слова:** насос, вал, подшипник, отказ, диаграмма Парето.

### Введение

В настоящее время машиностроительная отрасль России развивается высокими темпами. Растут не только объемы производства, но и номенклатура выпускаемой продукции. Не исключением является и отрасль насосостроения. При этом для промышленности важной задачей является не только обеспечение роста производства, но и обеспечение высокого уровня качества выпускаемой продукции, которое должно определяться не только конкурентоспособными техническими характеристиками, но и отказоустойчивостью [1].

Одним из направлений совершенствования технического оборудования является переход на эксплуатацию по фактическим условиям эксплуатации, а не только с использованием концепции планово-предупредительных ремонтов. В работах [2,3] представлена концепция предиктивно-адаптивной эксплуатации, одним из элементов которой является построение моделей определения остаточного ресурса критических узлов технического оборудования, относительно отказов которых может быть построена стратегия ремонта по фактическому состоянию.

Определение перечня критических узлов может быть построено на анализе отказов технического оборудования с последующим выявлением наиболее подверженных выходу из строя единиц и детальному анализу физической природы отказа с последующим поиском соответствующей математической модели.

### Основная часть

АО "ГМС Ливгидромаш" специализируется на производстве насосов и насосного оборудования различных типов и назначения. В настоящее время предприятие разрабатывает и производит более 1000 типоразмеров промышленных и бытовых насосов. География поставок охватывает большинство регионов России и, более чем, 30 стран мира.

Несмотря на высокую конкурентоспособность продукции предприятия вопросы качества всегда находятся в зоне повышенного внимания, так как именно непрерывная работа над качеством продукции способна обеспечить постоянное соответствие выпускаемых насосов высоким требованиям потребителей.

Помимо развития действующей на предприятии системы обеспечения качества разработки и производства большое внимание уделяется обеспечению качества в эксплуатации.

В рамках данной статьи проведем анализ качества эксплуатации насоса шестеренного НМШ 32-10. Габаритный чертеж насоса представлен на рисунке 1.

Насос относится к изделиям общего назначения, непрерывного длительного применения, восстановляемым, обслуживаемым, ремонтируемым необезличенным способом согласно требованиям ГОСТ 27.003-2016.

Он обладает следующими техническими характеристиками:

- подача не менее  $18 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;
- давление на выходе не более 4, 6 или  $10 \text{ кгс}/\text{см}^2$  в зависимости от модификации;
- частота вращения 980 об/мин;
- мощность не более 4,5, 5,5 и 7,5 кВт в зависимости от модификации.

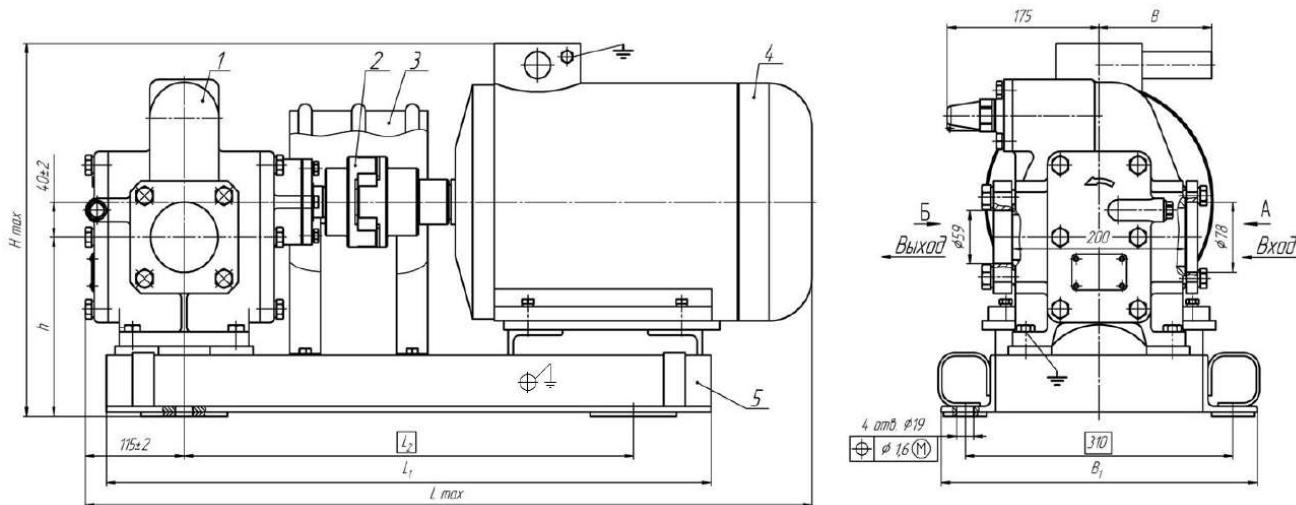


Рисунок 1 – Габаритный чертеж насоса НМШ 32-10

В таблице 1 представлен анализ количества отказов в процентном соотношении от числа реализованной продукции за 2015 – 2017 гг.

Таблица 1 – Статистика отказов насосов

Марка насоса	Количество отказов, шт.			Реализовано, шт.			Дефектность, %		
	2017	2016	2015	2017	2016	2015	2017	2016	2015
НМШ32-10	2	8	7	2936	3400	4194	0,07	0,24	0,17

Как видно из таблицы 1 в последние два года наблюдается тенденция роста числа отказов насосов в эксплуатации, что в свою очередь негативно сказывается на удовлетворенности потребителей, и росте финансовых потерь производителя.

В таблице 2 представлены детали и узлы, которые вышли из строя и привели к остановкам насосов в составе технологических линий заказчиков.

Таблица 2 – Причины отказов насосов

№п/п	Характерные несоответствия	Количество
1	Дефект вала	7
2	Неисправность электродвигателя	10
3	Неисправность торцового уплотнения	7
4	Неисправность подшипника	27
5	Дефекты литья	5
6	Некачественная сборка	4
7	Прослаблена п/муфта, вал	3

Для наглядности на основе данных таблицы 2 строится диаграмма Парето (рисунок 2), из анализа которой можно сделать вывод, что наиболее критическим узлом насоса НМШ 32-10 являются подшипники. При этом можно отметить, что роликовые подшипники являются сравнительно дешёвыми комплектующими в составе всего насоса и при их своевременной замене могут значительно сократить издержки производителя при внеплановых остановах.

Разница между ожидаемым и фактическим ресурсом возникает в результате серьёзных исходных методик расчёта и конечных регламентов и технических условий, используемых

производителем, за счёт упрощений и не учёте различных эксплуатационных факторов. Так в [4] показано, что роликовые подшипники ведущего и ведомого валов насоса работают в различных условиях смазывания в зависимости от режима работы насоса, что, в свою очередь приводит к необходимости корректировки модели расчёта ресурса подшипника в части коэффициента смазывания [5,6]. Другие группы отказов связаны с неисправностями электродвигателя, дефектами вала, неисправностями уплотнений, дефектами литья корпусных деталей. Ещё одна группа отказов связана с культурой производства и сборки конечного изделия.

Применяя данную методику, можно выделить критический узел, относительно которого необходимо строить стратегию снижения количества отказов путём внедрения предиктивного анализа остаточного ресурса по фактическим условиям эксплуатации.

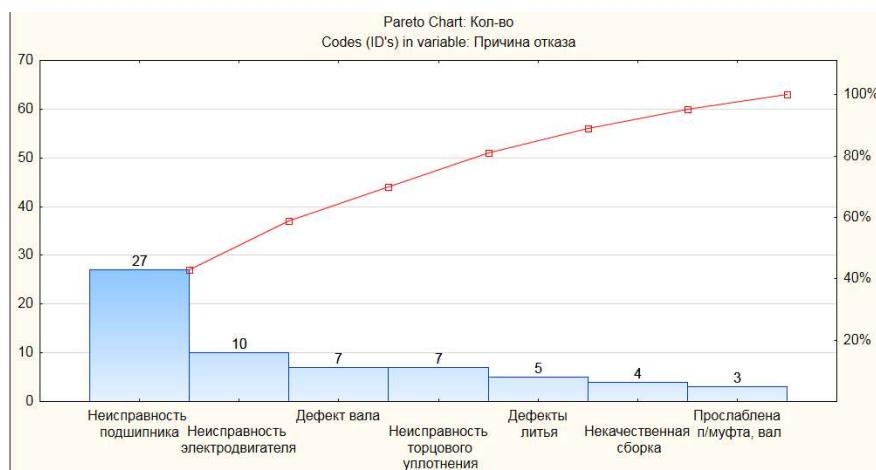


Рисунок 2 – Диаграмма Парето причин отказов насосов

Следующим шагом методики является рассмотрение конкретных дефектов критических узлов на основании данных отдела гарантийного сервиса и ремонта. На рисунке 3 представлен дефект подшипника, связанный с деформацией тел качения из-за повышенной нагрузки (выделенная поверхность матовая с повышенной шероховатостью и видимым износом).



Рисунок 3 – Дефект подшипника

Электродвигатели являются покупными узлами и их отказы обусловлены недостаточным уровнем контроля качества у поставщиков.

Дефекты валов возникают по многим причинам, в числе которых могут быть неправильная эксплуатация, нарушения технологии изготовления (например, неправильный

отжиг), ошибки при сборке [7, 8]. На рисунке 4 представлен дефект в виде коррозии и трещины вала вследствие неверной эксплуатации.



Рисунок 4 – Дефект вала

Торцовое уплотнение выходит из строя по причине коррозии (она может быть химической, электрохимической), перегрева, различного рода отложений, превышения допустимых напряжений [9]. На рисунке 5 приведен пример трещины кольца.

Нарушение технологии литья приводит к различным механическим повреждениям узлов насосного оборудования (рисунок 6). При этом отсутствует возможность выявить все дефекты в процессе контроля качества, вследствие чего некоторые дефекты проявляют себя на этапе эксплуатации, что в свою очередь приводит к отказу насоса [10].

Главными причинами некачественной сборки являются несоблюдение персоналом технологии проведения сборочных работ, отсутствие применения японского подхода *roka-yoke* (принцип нулевой ошибки или защита от дурака) делающего невозможным осуществить работу неверным способом. Некорректная посадка деталей приводит к их износу и в конце концов к усталостному разрушению [11]. Пример кавитационного износа рабочих поверхностей представлен на рисунке 7.

Наиболее редко встречаются отказы насоса из-за ослабления посадки полумуфты на валу.



Рисунок 5 – Дефект торцового уплотнения

Анализ дефектовки подшипников в отказавших насосах приведён на рисунке 8, из которого видно, что наиболее частой причиной потери работоспособности являются совокупные проблемы из-за чрезмерной нагрузки и неправильной смазки.

Из построенной диаграммы Парето мы видим, что наибольший вклад в отказ подшипников вносят чрезмерная нагрузка и проблемы со смазкой. Несмотря на то, что в процессе анализа были выявлены различные причины отказа, на деле многие из них между собой тесно взаимосвязаны. Например, высыхание смазочного материала, снижение его вязкости приводят к чрезмерной нагрузке на подшипник и как следствие к его отказу.

Исследования влияния воды на свойства смазочных материалов свидетельствуют о том, что наличие даже долей процента воды в смазке приводит к сокращению срока службы

подшипника в два раза. Также негативно на срок службы подшипника влияет попадание в смазочный материал мельчайших твердых частиц.



Рисунок 6 – Дефекты литья

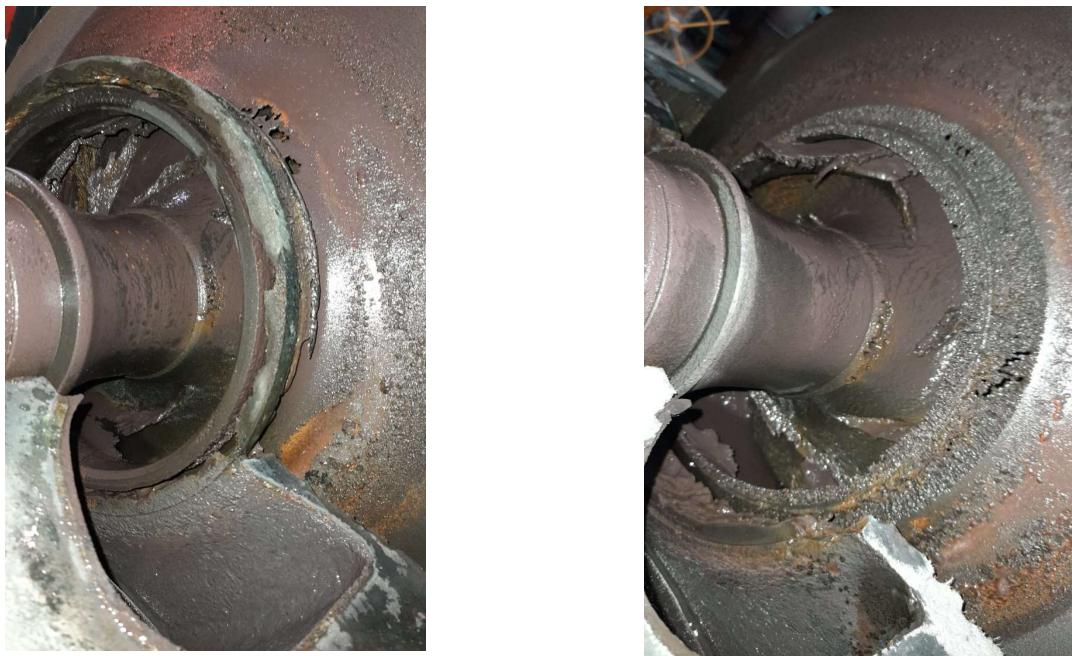


Рисунок 7 – Кавитационный износ

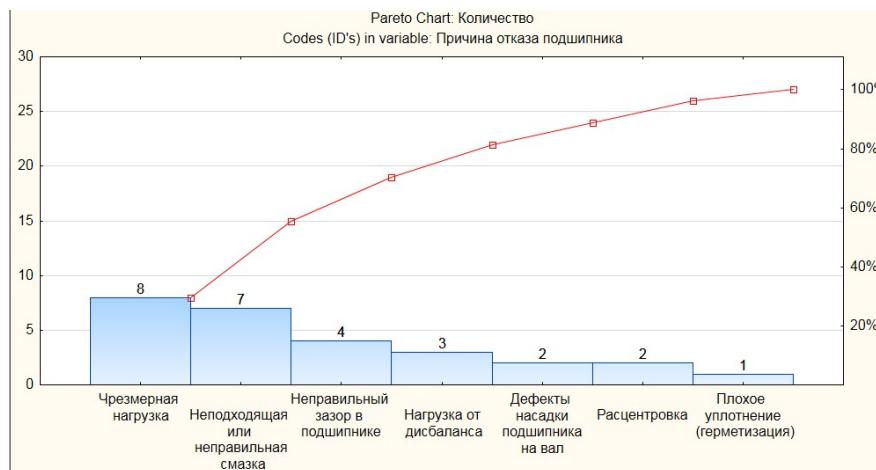


Рисунок 8 – Диаграмма Парето причин отказов подшипников

Неправильный зазор, дефекты насадки подшипника на вал, расцентровка приводят к возникновению дополнительных вибраций, а они в свою очередь приводят к повышению

температуры подшипника, ухудшению свойств смазочных материалов, росту нагрузки и как следствие к выходу его из строя.

Анализ причин выхода из строя подшипников позволяет сделать вывод, что применение различных датчиков (температуры, вибрации, частоты вращения, направление и угловую скорость вращения и т.д.) может дать информацию о техническом состоянии подшипников в процессе эксплуатации [12]. Сбор и обработка поступающей от датчиков информации позволит создать предиктивную модель расчета ресурса насоса и тем самым своевременно, не дожинаясь отказа, заменять подшипник, либо направлять его на ремонт или обслуживание. Также программно-аппаратный комплекс подшипника способен своевременно информировать оператора о выходе какого-либо параметра за допустимые границы, либо о резком изменении параметров, что в свою очередь позволит оператору оперативно принять меры по стабилизации ситуации.

Исходя из полученных выводов целесообразно предложить дальнейшую разработку устройства контроля и обработки информации с функцией прогноза отказа. В случае с насосами НМШ 32-10 важно учесть следующие особенности конструкции и работы насоса:

- подшипники закрыты корпусом и находятся в постоянном контакте со смазкой;
- температура смазки будет влиять на точность показаний считывающего устройства;
- контроль вибрации можно проводить на корпусе насоса;
- необходима возможность интеграции применяющихся датчиков в систему без дополнительного монтажа;
- одна пара подшипников находится под крышкой и позволяет установку дополнительных устройств контроля в свободное пространство, вторая же закрыта уплотнением, что затрудняет использование модульных решений;
- дублирование датчиков в тех случаях, когда показатели собираются на разных элементах насоса, например, температура на входе, выходе и подшипниковом узле насоса.

Из-за особенностей конструкции такие показатели, как температура смазки или корпусных деталей, вибрация, наличие электрического замыкания (в редких случаях), частоту оборотов и скорость вращения можно измерить на подшипниковом узле. Давление, подача, КПД и некоторые другие – вне подшипникового узла, поэтому система должна объединять данные с нескольких датчиков, для оценки всех параметров при работе.

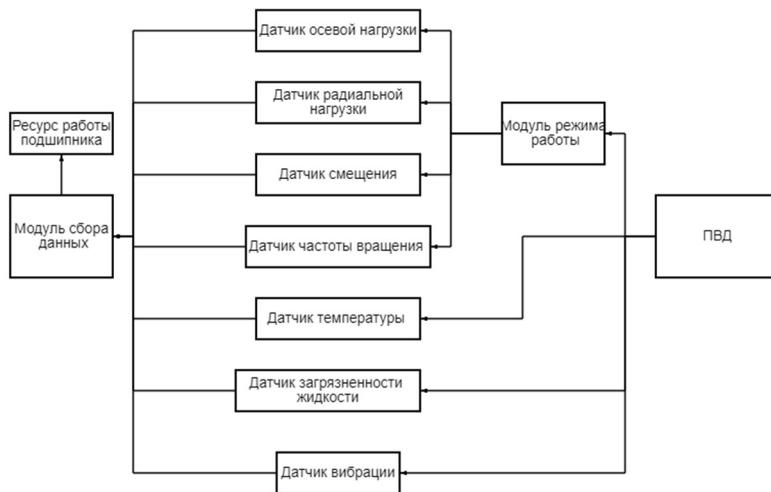


Рисунок 9 – Модель ПВД

Принимая вышесказанное во внимание, целесообразно разделить устройства контроля на 2 типа – внешние, не устанавливаемые в корпус и внутренние – в корпусе насоса. Так же внутренние датчики должны отвечать критерию модульности в зависимости от наличия дополнительного пространства в месте установки.

Предлагается следующая обобщённая модель подшипника с встроенным датчиками (ПВД) (рисунок 9). Данная схема охватывает максимальное количество данных, которые можно использовать для анализа состояния узла в реальном времени, но в ту же очередь он

требует дополнительного пространства для размещения всех датчиков. Поэтому одной из задач дальнейшего исследования является отбор контролируемым параметров, прямой или косвенный анализ которых, позволит связать условия реальной эксплуатации и математическую модель определения ресурса подшипника.

### Заключение

Анализ качества позволяет выбрать деталь, узел, процесс, относительно которых может быть построена методика предиктивной диагностики или определения остаточного ресурса по фактическим условиям эксплуатации. Создание интегрируемых в штатную систему мониторинга программно-аппаратных комплексов является актуальной задачей с одновременной разработкой алгоритмов предиктивного анализа остаточного ресурса критических узлов технического оборудования по фактическим условиям эксплуатации. В настоящее время описанный выше подход находит применение в подшипниках компании SKF [13] для буксовых подшипников железнодорожного транспорта.

Внедрение методов интеллектуального мониторинга и предиктивной диагностики позволит существенно повысить надёжность эксплуатации технического оборудования и снизить издержки при простоях из-за внезапных отказов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жариков Р. В. Концепция формирования и поддержания качества машиностроительной продукции // Организатор производства. 2010. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontsepsiya-formirovaniya-i-podderzhaniya-kachestva-mashinostroitelnoy-produktsii> (дата обращения: 19.11.2023).
2. Polyakov, R, Paholkin, E, Kudryavcev, I, & Krupenin, N. Improving the Safety of Power Plants by Developing a Digital Twin and an Expert System for Adaptive-Predictive Analysis of the Operability of Gas Turbine Units / *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Volume 6: Education; Electric Power.* Virtual, Online. September 21–25, 2020. V006T09A001. ASME. <https://doi.org/10.1115/GT2020-14217>.
3. Polyakov, R., Majorov, S., Kudryavcev, I., Krupenin, N. Predictive analysis of rotor machines fluid-film bearings operability / *Vibroengineering Procedia*, Vol. 30, 2020, p. 61-67. <https://doi.org/10.21595/vp.2020.21379>
4. Поздняков В.В., Поляков Р.Н., Корнеев А.Ю. Влияние режимов работы шестерённого насоса на трение в роликовых подшипниках и их отказы / Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2023. – № 6(362). – С. 79-87.
5. ISO/TS 16281:2008 Rolling bearings — Methods for calculating the modified reference rating life for universally loaded bearings
6. Подшипники качения SKF. Каталог. – SKF Group 2017, 1364 с.
7. Гу Ц., Редников С.Н. Анализ отказов шестерённых насосов / Молодой исследователь. материалы 8-й научной выставки-конференции научно-технических и творческих работ студентов. Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Южно-Уральский государственный университет. 2021. С. 451-454.
8. Лезин П.П., Ионов П.А., Нуйзин Е.А. Анализ причин отказов шестеренных насосов и перспективы их восстановления / Технические и естественные науки: проблемы, теория, эксперимент. Межвузовский сборник научных трудов. 2002. С. 73-77.
9. Уплотнения и уплотнительная техника: Справочник / Л.А. Кондаков, А.И. Голубев и др. – М: Машиностроение, 1994.
10. Вахрушев С.И., Манн С.В., Гончаренко Г.М. Исследование отказов и способы повышения надежности шестеренных насосов гидроприводов машин / Наука и военная безопасность. 2017. № 1 (8). С. 73-77.
11. Созинова Д.Н., Фомина Е.Е., Гуськов М.А., Грозовский Г.И., Круглов В.В. Анализ риска при эксплуатации насосного оборудования / Химия и технология топлив и масел. 2020. № 2 (618). С. 31-34.
12. Зуевский В.А., Климук Д.О., Шембереев И.А. Причины потери работоспособности шестеренчатого насоса и методы их устранения / Технический сервис машин. 2020. № 3 (140). С. 98-107.
13. SKF Axletronic [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.promshop.info/cataloguespdf/bearings\\_units\\_and\\_housings/RTB\\_1\\_07\\_AXLETRONIC.pdf](https://www.promshop.info/cataloguespdf/bearings_units_and_housings/RTB_1_07_AXLETRONIC.pdf) (дата обращения: 06.07.2022).

**Поздняков Владислав Владиславович**  
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С.  
Тургенева»,  
аспирант  
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 29  
Тел. +79996019638  
E-mail: funreader@inbox.ru

**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

**Соломин Олег Вячеславович**  
ООО НПП «ФОСТ»,  
доктор техн. наук, профессор,  
коммерческий директор  
107023, г. Москва, ул. Малая  
Семёновская, д. 3  
Тел. +7 910 451 79 47  
E-mail: ovsolomin@mail.ru

V.V. POZDNYAKOV, R.N. POLYAKOV, O.V. SOLOMIN

## METHOD FOR DETERMINING THE LIST OF CRITICAL PUMP COMPONENTS BY ANALYZING OPERATIONAL QUALITY IN REAL CONDITIONS

**Abstract.** The article is devoted to the analysis of the quality of pump operation in real conditions using the NMSh32-10 gear pump as an example. The main technical characteristics of the pump, statistics of sales and pump failures are given. The concept of predictive operation involves identifying critical components of technical equipment, in relation to which it is necessary to build models for determining the residual resource. A methodology for analyzing the main causes of failures of the main pump components is proposed, and the most problematic components are identified. A study of the causes of bearing failures was carried out and the concept of a hardware and software complex for monitoring the technical condition and predictive analysis of the residual life of bearings based on actual operating conditions was proposed.

**Keywords:** pump, shaft, bearing, failure, Pareto diagram.

### BIBLIOGRAPHY

1. Zharikov R.V. Concept of formation and maintenance of quality of engineering products // Organizer of production. 2010. No. 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontsepsiya-formirovaniya-i-podderzhaniya-kachestva-mashinostroitelnoy-produktsii> (date of access: 11/19/2023).
2. Polyakov, R, Paholkin, E, Kudryavcev, I, & Krupenin, N. Improving the Safety of Power Plants by Developing a Digital Twin and an Expert System for Adaptive-Predictive Analysis of the Operability of Gas Turbine Units / Proceedings of the ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Volume 6: Education; Electric Power. Virtual, Online. September 21–25, 2020. V006T09A001. ASME. <https://doi.org/10.1115/GT2020-14217>.
3. Polyakov, R., Majorov, S., Kudryavcev, I., Krupenin, N. Predictive analysis of rotor machines fluid-film bearings operability / Vibroengineering Procedia, Vol. 30, 2020, p. 61-67. <https://doi.org/10.21595/vp.2020.21379>
4. Pozdnyakov V.V., Polyakov R.N., Korneev A.Yu. The influence of gear pump operating modes on friction in roller bearings and their failures / Fundamental and applied problems of engineering and technology. – 2023. – No. 6(362). – P. 79-87.
5. ISO/TS 16281:2008 Rolling bearings — Methods for calculating the modified reference rating life for universally loaded bearings
6. SKF rolling bearings. Catalog. – SKF Group 2017, 1364 pp.
7. Gu Ts., Rednikov S.N. Failure analysis of gear pumps / Young researcher. materials of the 8th scientific exhibition-conference of scientific, technical and creative works of students. Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation South Ural State University. 2021. pp. 451-454.
8. Lezin P.P., Ionov P.A., Nuyanzin E.A. Analysis of the causes of failures of gear pumps and prospects for their restoration / Technical and natural sciences: problems, theory, experiment. Interuniversity collection of scientific papers. 2002. pp. 73-77.
9. Seals and sealing technology: Directory / L.A. Kondakov, A.I. Golubev et al. - M: Mechanical Engineering, 1994.
10. Vakhrushev S.I., Mann S.V., Goncharenko G.M. Investigation of failures and methods for increasing the reliability of gear pumps of hydraulic drives of machines / Science and military security. 2017. No. 1 (8). pp. 73-77.
11. Sozinova D.N., Fomina E.E., Guskov M.A., Grozovsky G.I., Kruglov V.V. Risk analysis during the operation of pumping equipment / Chemistry and technology of fuels and oils. 2020. No. 2 (618). pp. 31-34.
12. Zuevsky V.A., Klimyuk D.O., Shemberev I.A. Causes of gear pump failure and methods for eliminating them / Technical service of machines. 2020. No. 3 (140). pp. 98-107.
13. SKF Axletronic [Electronic resource]. – Access mode: [https://www.promshop.info/cataloguespdf/bearings\\_units\\_and\\_housings/RTB\\_1\\_07\\_AXLETRONIC.pdf](https://www.promshop.info/cataloguespdf/bearings_units_and_housings/RTB_1_07_AXLETRONIC.pdf) (access date: 07/06/2022).

**Pozdnyakov Vladislav Vladislavovich**  
Orel State University named after I.S. Turgenev  
graduate student  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
Ph.: +79996019638  
E-mail: funreader@inbox.ru

**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

**Solomin Oleg Vyacheslavovich**  
OOO NPP «FOST»,  
Doctor of Technical Science,  
Professor,  
Commercial director,  
107023, Moscow, Malaya Semenovskaya Str., 3  
Ph. +7 910 451 79 47  
E-mail: ovsolomin@mail.ru

© B.B. Поздняков, Р.Н. Поляков, О.В. Соломин, 2024

# **ПРИБОРЫ, БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ**

УДК 504.3.054:614.7

DOI: 10.33979/2073-7408-2024-365-3-134-141

Е.А. ГАНИНА, А.С. РЯБЫШЕНКОВ, Н.Р. ХАРЛАМОВ, В.И. КАРАКЕЯН,  
М.А. ЧУДАКОВА, И.А. КОЛУПАЕВ

## **ОЦЕНКА РИСКА ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ НАСЕЛЕНИЯ ОТ ВЫБРОСОВ ПРОИЗВОДСТВ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ**

**Аннотация.** Приводятся результаты оценки канцерогенного и неканцерогенного рисков для здоровья населения от выбросов приоритетных загрязняющих веществ (ЗВ) действующих производств микроэлектроники Северной промышленной зоны г. Зеленограда. В качестве основных критерии приоритетности приняты классы опасности ЗВ и объемы их обращения в технологиях микроэлектроники. Построены поля рассеивания ЗВ от наиболее представительных производств микроэлектроники при благоприятных и неблагоприятных метеорологических условиях в разные периоды года и выполнена картографическая визуализация значений риска посредством геоинформационных технологий. Установлено, что в настоящее время уровень риска для здоровья населения селитебных районов, прилегающих к исследуемой зоне, находится в допустимых пределах и не требует проведения дополнительных регулирующих мер по его снижению. Полученные результаты могут быть основой для прогнозирования уровня экологической безопасности при росте производства электронной техники, а также служить исходной информацией при вероятном пересмотре размеров санитарно-защитных зон (СЗЗ) предприятий.

**Ключевые слова:** канцерогенные и неканцерогенные риски, приоритетные загрязняющие вещества, благоприятные и неблагоприятные метеорологические условия, прогнозирование уровня экологической безопасности, санитарно-защитная зона.

### **Введение**

Загрязнение атмосферного воздуха является одним из существенных факторов появления и развития многих респираторных заболеваний различных форм тяжести, что подтверждается наблюдаемым в последние годы в г. Зеленограде высоким уровнем таких нарушений здоровья детей и подростков. Существует мнение, что это может быть связано со спецификой научноемкой природно-технической геосистемы (НПТГ) с доминирующей ролью микроэлектронного производства [1-3].

Выбросы таких производств содержат широкий спектр канцерогенных и неканцерогенных ЗВ, способными в зависимости от дозы и экспозиции оказывать острое или хроническое воздействие на организм человека. Возможные эффекты суммации и потенцирования многих ЗВ, а также превращения первичных загрязнителей в более опасные вторичные химические соединения ведут к ухудшению экологической обстановки. При этом наиболее неблагоприятной она складывается в селитебных районах, расположенных вблизи промышленных зон. СЗЗ предприятий микроэлектроники, установленные в целях санитарно-эпидемиологического благополучия населения, даже при соблюдении всех экологических требований не могут гарантировать надлежащий уровень экологической безопасности при сложившемся зонировании территории НПТГ и весьма неравномерной концентрации таких производств. В свете планируемого значительного увеличения масштабов производства продукции микроэлектроники, на границе близлежащих селитебных районов возможно превышение целевых параметров уровня риска [4-6].

В связи с этим оценка риска для здоровья населения представляет особую актуальность, а систематический контроль и разработка мероприятий по снижению вероятности его возникновения является приоритетной задачей обеспечения экологической безопасности НПТГ.

### **Основная часть**

В настоящем исследовании приводятся результаты оценки канцерогенного и неканцерогенного рисков для здоровья населения от загрязнения атмосферного воздуха производствами микроэлектроники, действующими в настоящее время на территории Северной промышленной зоны НПТГ. Методической основой исследования является нормативный документ Р 2.1.10.1920-04 «Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду». Построение полей рассеивания ЗВ выполнялось с помощью программы «Призма» с

последующей оцифровкой изолиний концентраций и их интерполяции методом «Кригинг» в геоинформационной системе «Surfer», что позволило получить объективную картину загрязнения атмосферного воздуха.

Канцерогенный риск (*CR*) определяется по формуле [7, 8]:

$$CR = ADD * SF, \quad (1)$$

где *ADD* – средняя суточная доза в течение жизни, мг/(кг\*день);

*SF* – фактор канцерогенного потенциала, (мг/(кг\*сутки))<sup>-1</sup>.

Расчет среднесуточных доз при ингаляционном воздействии ЗВ, поступающих с атмосферным воздухом, проводится по формуле:

$$ADD = \frac{((CA * T_{out} * V_{out}) + (C_h * T_{in} * V_{in}))EF * ED}{BW * AT * 365}, \quad (2)$$

где *CA* – концентрация вещества в атмосферном воздухе, мг/м<sup>3</sup>;

*C<sub>h</sub>* – концентрация вещества в воздухе внутри помещения, мг/м<sup>3</sup>. При отсутствии данных *C<sub>h</sub>* = *CA*;

*T<sub>out</sub>* – время, проводимое вне помещений, час/день (среднее значение – 8 час/день);

*V<sub>out</sub>* – скорость дыхания вне помещений, м<sup>3</sup>/час (среднее значение – 1,4 м<sup>3</sup>/час);

*V<sub>in</sub>* – скорость дыхания внутри помещения, м<sup>3</sup>/час (среднее значение – 0,63 м<sup>3</sup>/час);

*EF* – частота воздействия, дней/год (среднее значение – 350 дней/год);

*ED* – продолжительность воздействия, лет. (среднее значение для взрослых – 30 лет, детей – 6 лет);

*BW* – масса тела, кг (среднее значение для взрослых – 70 кг, детей – 15 кг);

*AT* - период осреднения экспозиции, лет. (среднее значение для взрослых – 30 лет, детей – 6 лет, канцерогены – 70 лет (вне зависимости от возраста)).

Для веществ, не обладающих канцерогенным действием, оценка риска проводится на основе коэффициента опасности (*HQ*), представляющего собой соотношение между величиной экспозиции (среднесуточная концентрация ЗВ в атмосферном воздухе) и безопасным уровнем воздействия (референтная концентрация или в случае ее отсутствия ПДК ЗВ в атмосферном воздухе) [9, 10]:

$$HQ = C_i / RfC, \quad (3)$$

где *HQ* – коэффициент опасности;

*C<sub>i</sub>* – среднесуточная концентрация ЗВ в атмосферном воздухе, мг/м<sup>3</sup>;

*RfC* – референтная концентрация или ПДК ЗВ в атмосферном воздухе, мг/м<sup>3</sup>.

Для условий одновременного поступления нескольких веществ ингаляционным путем, коэффициент опасности комбинируемого эффекта рассчитывается по формуле:

$$HI = HQ_1 + HQ_2 + \dots + HQ_i, \quad (4)$$

$$CI = CR_1 + CR_2 + \dots + CR_i, \quad (5)$$

где *HI* – суммарный неканцерогенный риск вследствие суммирующего эффекта коэффициентов опасности для отдельных компонентов смеси воздействующих веществ;

*HQ<sub>i</sub>* – коэффициенты опасности для отдельных компонентов смеси воздействующих веществ;

*CI* – суммарный канцерогенный риск вследствие эффекта влияния нескольких канцерогенов;

*CR<sub>i</sub>* - суммарный канцерогенный риск вследствие суммирующего эффекта коэффициентов опасности для отдельных компонентов смеси воздействующих веществ.

Оценочные шкалы канцерогенного и неканцерогенного рисков по уровню опасности для здоровья населения представлены в таблицах 1 и 2.

Проведенный анализ производственно-технологической документации, включая инвентаризацию стационарных источников и проекты предельно-допустимых выбросов, позволил установить, что наиболее опасными (1-2 класс опасности) и приоритетными неканцерогенными ЗВ производств микроэлектроники являются: ортофосфорная и серная кислоты, гидрохлорид, азотная кислота, кремния диоксид, газообразные соединения фтора, N,N-диметилформамид. К веществам канцерогенного действия относятся бенз[а]пирен, формальдегид, свинец и его неорганические соединения.

В качестве исходных данных для расчета рисков использовались результаты построения полей рассеивания в атмосферном воздухе вышеперечисленных ЗВ, выбрасываемых от группы источников наиболее представительных производств

микроэлектроники Северной промышленной зоны в теплый (ТПГ) и холодный периоды года (ХПГ) при благоприятных (БМУ) и неблагоприятных метеорологических условиях (НМУ) (ослабление скорости ветра, штиль, туман) за 2023 год.

Таблица 1 – Оценочная шкала канцерогенного риска (CR)

Уровень опасности	Диапазон риска	Характеристика диапазона
Минимальный	$\leq 10^{-6}$	Уровни риска, которые воспринимаются как пренебрежимо малые, не отличающиеся от обычных, повседневных рисков, не требуют никаких дополнительных мероприятий по их снижению, подлежат только периодическому контролю
Низкий	$10^{-4} - 10^{-6}$	Соответствует предельно допустимому риску, т.е. верхней границе приемлемого риска, подлежит постоянному контролю, в некоторых случаях проводятся дополнительные мероприятия по его снижению
Средний	$10^{-3} - 10^{-4}$	Приемлем для профессиональных групп и не приемлем для населения в целом, требует разработки и проведения плановых оздоровительных мероприятий
Высокий	$\geq 10^{-3}$	Не приемлем ни для населения, ни для профессиональных групп, при его достижении необходимо давать рекомендации для лиц, принимающих решения о проведении экстренных оздоровительных мероприятий по снижению риска

Таблица 2 – Оценочная шкала неканцерогенного риска (HQ)

Уровень опасности	Диапазон риска
Допустимый	$< 0,8$
Предельно допустимый	$0,8-1,0$
Опасный	$> 1$

Таблица 3 – Результаты оценки канцерогенного риска

Загрязняющее вещество	БМУ				НМУ			
	ТПГ		ХПГ		ТПГ		ХПГ	
	CR							
	Взрослые	Дети	Взрослые	Дети	Взрослые	Дети	Взрослые	Дети
Свинец и его неорганические соединения	$4,3 \cdot 10^{-6}$	$6,3 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$4,1 \cdot 10^{-6}$	$6,2 \cdot 10^{-6}$	$7,1 \cdot 10^{-6}$	$5,6 \cdot 10^{-6}$	$7,8 \cdot 10^{-6}$
Бенз[а]пирен	$2 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$1,3 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-8}$	$2,8 \cdot 10^{-8}$	$2,1 \cdot 10^{-8}$	$3,3 \cdot 10^{-8}$
Формальдегид	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$3,4 \cdot 10^{-6}$	$2,9 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$3,2 \cdot 10^{-6}$
	CI							
	$6,9 \cdot 10^{-6}$	$7,8 \cdot 10^{-6}$	$4,4 \cdot 10^{-6}$	$6,6 \cdot 10^{-6}$	$9,6 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$8,6 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$

Полученные результаты показывают, что канцерогенные загрязняющие вещества на границе близлежащих селитебных районов имеют крайне низкие значения концентраций. Канцерогенный риск для здоровья населения разных возрастных групп от воздействия формальдегида, бенз[а]пирена, свинца и его неорганических соединений находится в пределах целевого диапазона, в целом, характеризуется как минимальный и не требует проведения дополнительных мероприятий по его снижению (таблица 3).

Среди неканцерогенных веществ наиболее значительной зоной негативного воздействия обладают серная кислота и гидрохлорид, что объясняется их высокой способностью к рассеиванию (рисунки 1-4).

Как следует из полей рассеивания, в зоне негативного воздействия оказываются селитебные районы, что даже, несмотря на незначительность концентраций ЗВ в приземных слоях атмосферного воздуха, в долгосрочной перспективе развития производств микроэлектроники может привести к рискам для здоровья населения.

На основе построенных полей рассеивания можно получить наглядное представление пространственного распределения риска как величины, интегрирующей вероятность возникновения и развития экологически обусловленных заболеваний. С этой целью территории Северной промышленной зоны, включая прилегающие к ней селитебные районы и лесные массивы, была разделена на небольшие квадраты – геотаксоны и по отдельности для каждого из них определен уровень неканцерогенного риска для здоровья населения при комбинированном воздействии наиболее опасных и приоритетных загрязняющих веществ в ТПГ и ХПГ при БМУ и НМУ (рисунки 5 и 6) [11-14].

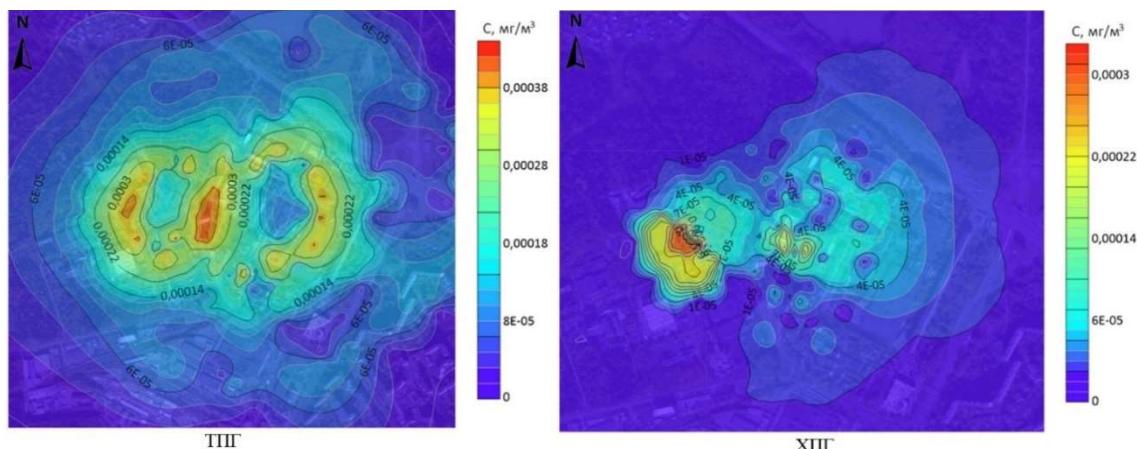


Рисунок 1 – Поля рассеивания серной кислоты в ТПГ и ХПГ при БМУ

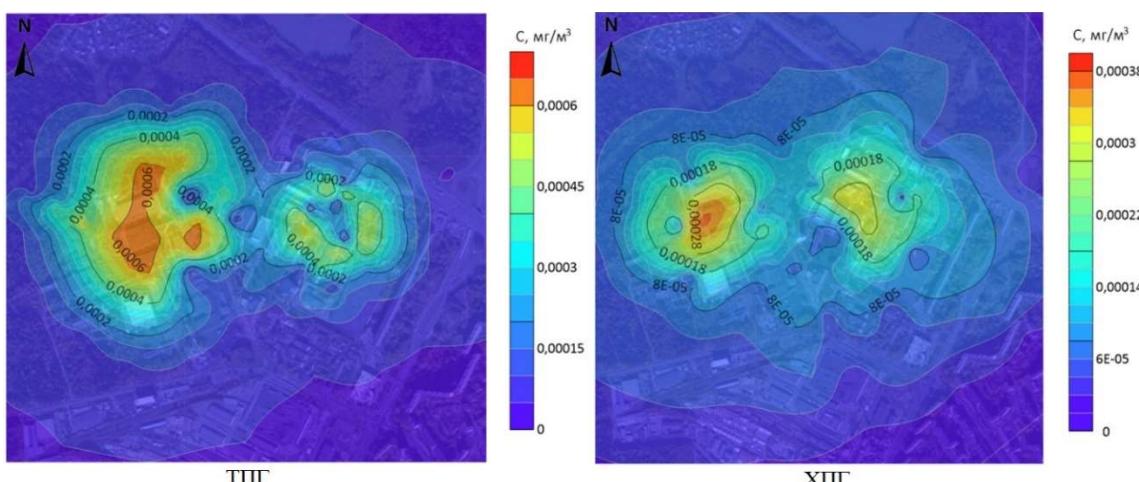


Рисунок 2 – Поля рассеивания серной кислоты в ТПГ и ХПГ при НМУ

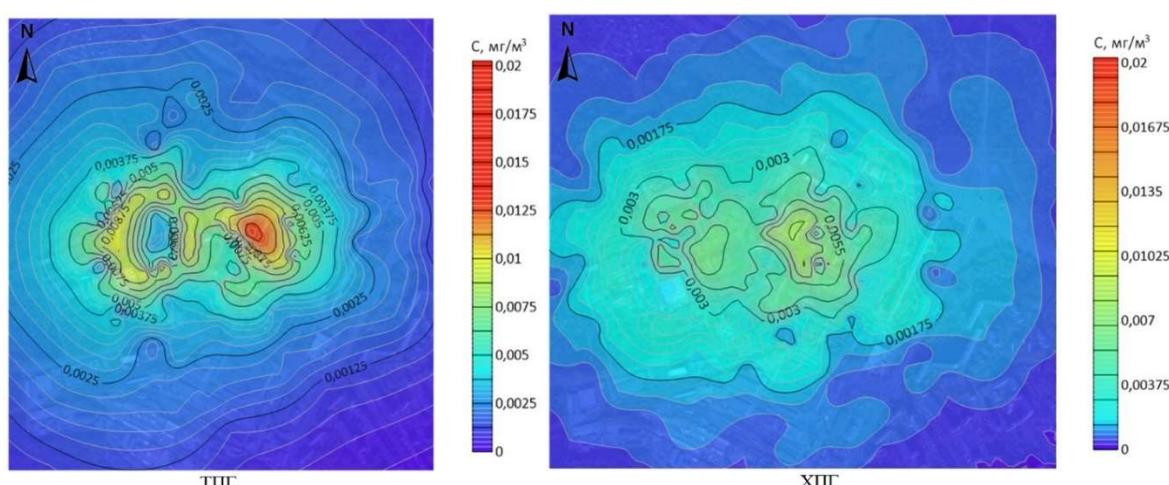


Рисунок 3 – Поля рассеивания гидрохлорида в ТПГ и ХПГ при БМУ

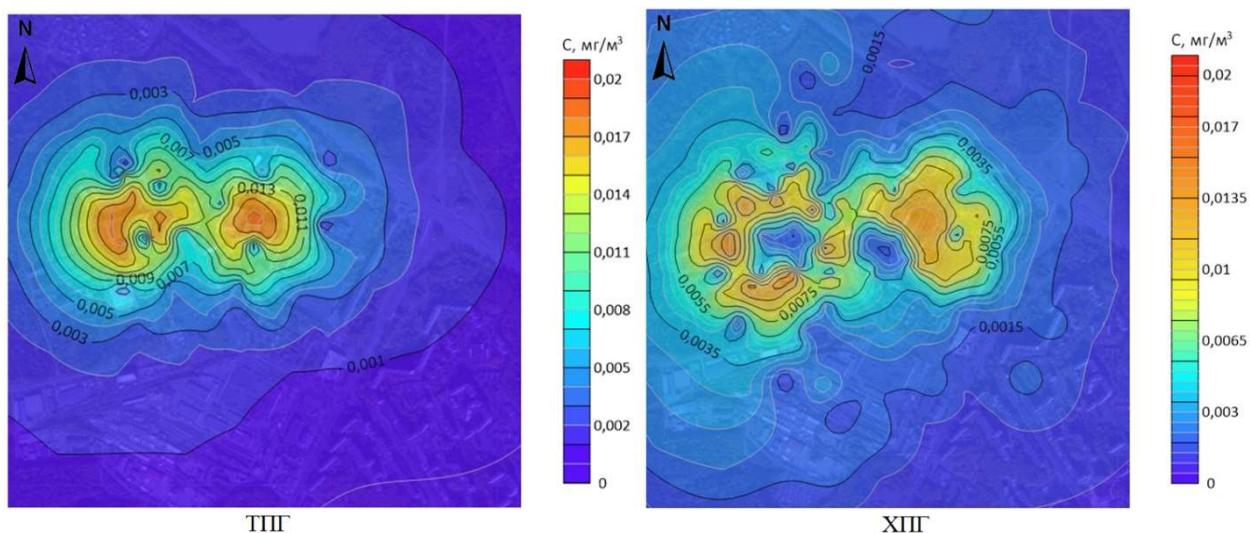


Рисунок 4 – Поля рассеивания гидрохлорида в ТПГ и ХПГ при НМУ

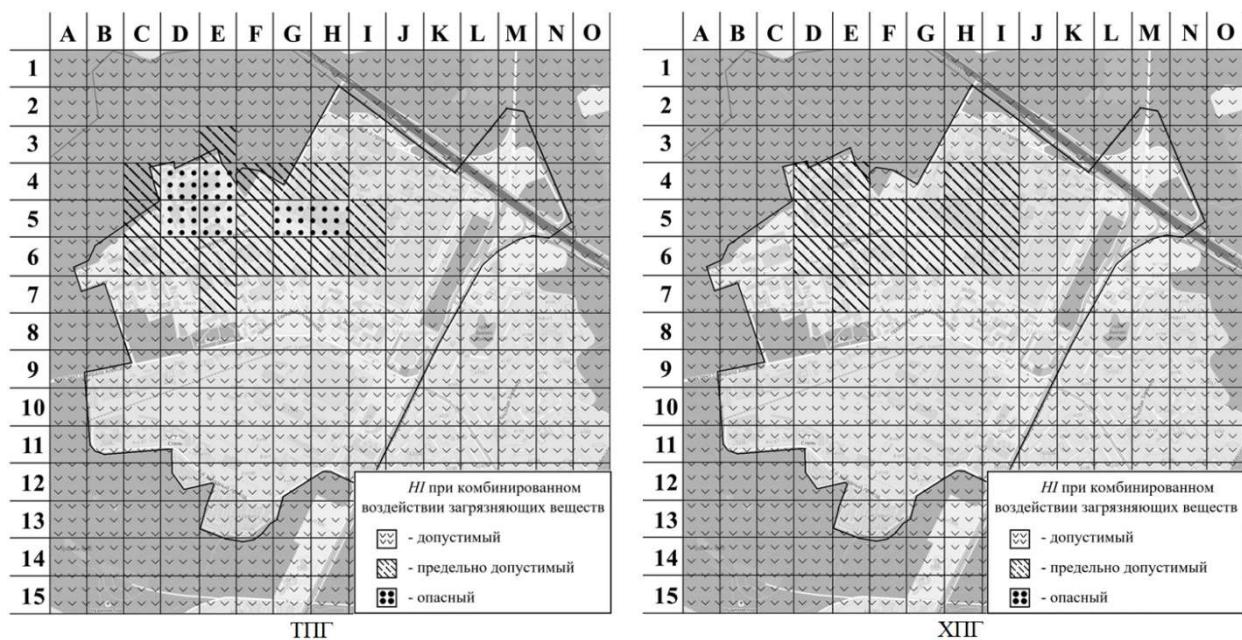


Рисунок 5 – Экологическая карта неканцерогенного риска для здоровья населения в ТПГ и ХПГ при БМУ

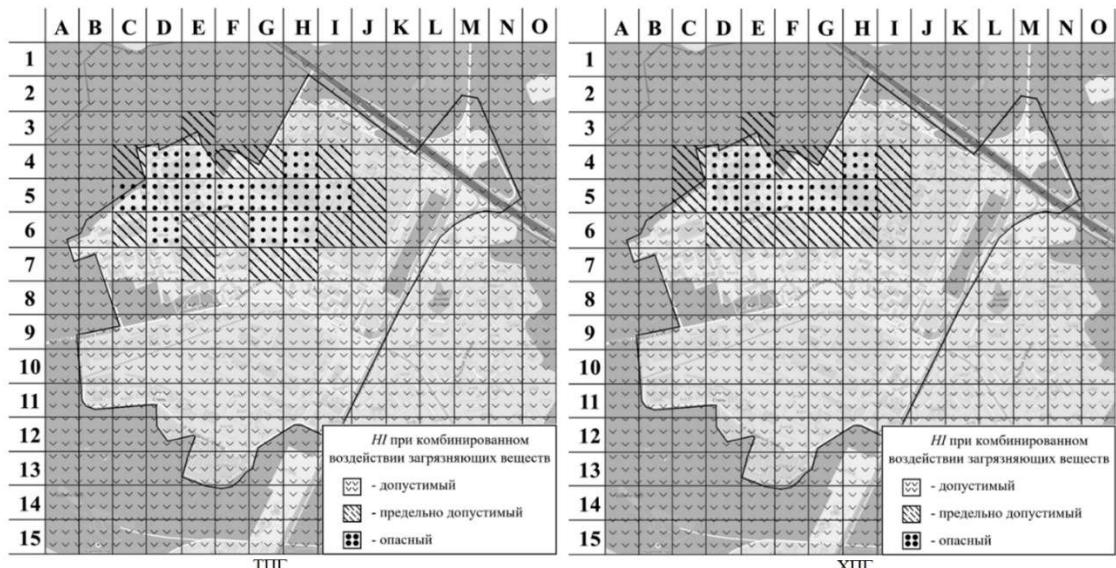


Рисунок 6 – Экологическая карта неканцерогенного риска для здоровья населения в ТПГ и ХПГ при НМУ

Каждому геотаксону присвоен порядковый номер строки (от 1 до 15) и столбца (от А до О). В качестве параметров при оценке неканцерогенного риска использовались референтные концентрации ( $RfC$ ) при ингаляционном поступлении ЗВ в организм человека.

Опасный уровень неканцерогенного риска при комбинированном воздействии ЗВ наблюдается у следующих геотаксонов при БМУ в ТПГ: D4, D5, E4, E5, G5 и H5. При НМУ в ТПГ: C5, D4-D6, E4, E5, F5, G5, G6, H4-H6, I5; в ХПГ: D4, D5, E4, E5, F5, G5, H4 и H5.

Наибольшая опасность достигается при НМУ для ТПГ, так как в этот период наблюдаются наиболее слабые ветры, способствующие возникновению смоговых и квазисмоговых ситуаций, приводящие к слабой проветриваемости территории и накоплению ЗВ в приземных слоях атмосферного воздуха.

Рассчитанный по пороговой модели неканцерогенный риск на границе селитебных районов при БМУ и НМУ в разные периоды года имеет допустимый уровень, не вызывающий беспокойства. Однако, при интенсификации производств микроэлектроники и рассмотрении более полного перечня выбрасываемых в атмосферный воздух ЗВ возможно изменение существующего уровня риска, что обуславливает необходимость дальнейших исследований проблемы.

### Заключение

Проведенная оценка канцерогенного и неканцерогенного рисков при БМУ и НМУ в ТПГ и ХПГ позволяет сделать вывод, что при существующих объемах производства электронной техники на территории Северной промышленной зоны НПТГ угроза здоровью населения вследствие загрязнения атмосферного воздуха приоритетными ЗВ отсутствует. На границе близлежащих селитебных районов наблюдается допустимый уровень неканцерогенного риска для здоровья населения от воздействия ортофосфорной и серной кислот, гидрохlorida, азотной кислоты, кремния диоксида, газообразных соединений фтора, N,N-Диметилформамида. Канцерогенный риск для здоровья населения разных возрастных групп от воздействия формальдегида, бенз[а]пирена, свинца и его неорганических соединений характеризуется как минимальный и не требует проведения дополнительных мероприятий по его снижению.

Результаты оценки риска действующих производств могут быть использованы при прогнозировании экологической безопасности НПТГ в свете дальнейшего развития микроэлектроники и выступать как предпроектный материал при возможном пересмотре размеров СЗЗ предприятий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственный доклад. «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в городе Москве в 2021 году» [Электронный ресурс] / Роспотребнадзор: сайт. URL: <https://77.rosпотребnadzor.ru/index.php/doc/infdoc/10802-gosudarstvennyj-doklad-o-sostoyanii-sanitarno-epidemiologicheskogo-blagopoluchiya-naseleniya-v-gorode-moskve-v-2021-godu> (дата обращения: 01.04.2024).
2. Государственный доклад. «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в городе Москве в 2022 году» [Электронный ресурс] / Роспотребнадзор: сайт. URL: <https://77.rosпотребnadzor.ru/index.php/doc/infdoc/11800-gosudarstvennyj-doklad-o-sostoyanii-sanitarno-epidemiologicheskogo-blagopoluchiya-naseleniya-v-gorode-moskve-v-2022-godu> (дата обращения: 01.04.2024).
3. Каракеян, В. И. Оценка экологической напряженности атмосферы промышленной зоны научно-технической геосистемы / В. И. Каракеян, Н. Р. Харламов, А. С. Рябышенков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2023. – № 5(361). – С. 91-98.
4. Харламов, Н. Р. Оценка ожидаемого экологического риска при увеличении масштаба производства изделий микроэлектроники / Н. Р. Харламов, А. С. Рябышенков, В. И. Каракеян // Приборы. – 2023. – № 2(272). – С. 47-54.
5. Болдырева, О. Н. Организация санитарно-защитных зон в зависимости от класса опасности предприятия / О. Н. Болдырева, В. М. Усков // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. – 2014. – № 1(3). – С. 15-18.
6. Просвирякова, И. А. Оценка риска здоровью населения при обосновании санитарно-защитных зон очистных сооружений канализации / И. А. Просвирякова, Е. В. Дроздова, А. Е. Пшегрода [и др.] // Передовые технологии в системах водоотведения населенных мест: Материалы международной научно-практической конференции, Минск, 12–13 февраля 2020 года. – Минск: Белорусский государственный технологический университет, 2020. – С. 141-144.
7. Ползик, Е. В. Методологические проблемы промышленной экологии / Е. В. Ползик, И. Л. Манжуров, В. С. Казанцев, В. Л. Лежнин // Экология урбанизированных территорий. – 2013. – № 2. – С. 23-29.
8. Неопределенности, связанные с химико-аналитическим обеспечением оценки риска для здоровья населения / Н. В. Зайцева, П. З. Шур, Н. Г. Атискова, А. Т. Шарифов // Здоровье населения и среда обитания - ЗНиСО. – 2010. – № 4(205). – С. 4-7.

9. Валеева, Э. Р. Оценка уровней риска неканцерогенных эффектов у подростков в условиях воздействия загрязненного атмосферного воздуха / Э. Р. Валеева, Г. А. Исмагилова, А. И. Зиятдинова // Актуальные вопросы анализа риска при обеспечении санитарно-эпидемиологического благополучия населения и защиты прав потребителей: Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Пермь, 15–16 мая 2019 года. – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2019. – С. 394–401.

10. Гигиеническая оценка канцерогенного и неканцерогенного рисков опасности химических веществ атмосферного воздуха Г. Братска / Л. П. Игнатьева, Л. В. Воробьева, И. Г. Погорелова [и др.] // Вестник Санкт-Петербургской государственной медицинской академии им. И.И. Мечникова. – 2005. – Т. 6, № 2. – С. 73–76.

11. Ефремов, А. А. Применение геоинформационных систем при оценке неканцерогенного риска здоровью населения городов Российской Федерации из-за загрязнения атмосферного воздуха / А. А. Ефремов // Метеорологический вестник. – 2018. – Т. 10, № 1. – С. 52–71.

12. Алексеев, В. В. Классификация геотаксонов по степени карбонового воздействия / В. В. Алексеев, Н. В. Орлова, Р. Е. Вавилов, В. С. Брызгало // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. – 2022. – Т. 1. – С. 215–217.

13. Куракина, Н. И. Оценка экологического состояния территории на основе геоинформационной модели / Н. И. Куракина, А. Р. Габидинова // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2014. – № 3(34). – С. 55–62.

14. Заалишвили, В. Б. Разработка карт индекса канцерогенного риска территории г. Владикавказа / В. Б. Заалишвили, О. Г. Бурдзиева, А. С. Кануков, Л. В. Дзобелова // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11, № 4. – С. 147–160.

**Ганина Елизавета Александровна**  
НИУ МИЭТ,  
Магистрант 1-го года обучения,  
124498, г. Москва, г. Зеленоград,  
пл. Шокина, дом 1  
Телефон: 89160019667  
E-mail: liza.ganina.2016@mail.ru

**Рябышненков Андрей Сергеевич**  
НИУ МИЭТ,  
Доктор технических наук,  
профессор,  
Профессор Института ПМТ  
124498, г. Москва, г. Зеленоград,  
пл. Шокина, дом 1  
Телефон: 89164045946  
E-mail: ryabyshenkov@mail.ru

**Харламов Николай Романович**  
НИУ МИЭТ,  
Аспирант 2-го года обучения,  
124498, г. Москва, г. Зеленоград,  
пл. Шокина, дом 1  
Телефон: 89773982786  
E-mail: KharlamovNR@yandex.ru

**Каракеян Валерий Иванович**  
НИУ МИЭТ,  
Доктор технических наук,  
профессор,  
Профессор Института ПМТ  
124498, г. Москва, г. Зеленоград,  
пл. Шокина, дом 1  
Телефон: 89162453229  
E-mail: zelikar@mail.ru

**Чудакова Мария Александровна**  
НИУ МИЭТ,  
Магистрант 2-го года обучения,  
124498, г. Москва, г. Зеленоград,  
пл. Шокина, дом 1  
Телефон: 89154864699  
E-mail: marychudo86@gmail.com

**Колупаев Иван Александрович**  
НИУ МИЭТ  
Бакалавр 4-го года обучения,  
124498, г. Москва, г. Зеленоград,  
пл. Шокина, дом 1  
Телефон: 89304712561  
E-mail: ivan.kolupaev@yandex.ru

E.A. GANINA, A.S. RIABYSHENKOV, N.R. KHARLAMOV, V.I. KARKEYAN,  
M.A. CHUDAKOVA, I.A. KOLUPAEV

## PUBLIC HEALTH RISK ASSESSMENT OF EMISSIONS FROM MICROELECTRONICS PRODUCTION

**Abstract.** The results of an assessment of carcinogenic and non-carcinogenic risks to public health from emissions of priority pollutants (pollutants) from existing microelectronics production facilities in the Northern Industrial Zone of Zelenograd are presented. The main priority criteria are the hazard classes of pollutants and the volumes of their circulation in microelectronics technologies. The dispersion fields of pollutants from the most representative microelectronics production facilities were constructed under favorable and unfavorable meteorological conditions in different periods of the year and cartographic visualization of risk values was performed using geoinformation technologies. It has been established that currently the level of risk to the health of the population of residential areas adjacent to the study area is within acceptable limits and does not require additional regulatory measures to reduce it. The results obtained can be the basis for predicting the level of environmental safety with the growth of electronic equipment production, as well as serve as initial information for a likely revision of the size of sanitary protection zones (SPZ) of enterprises.

**Keywords:** carcinogenic and non-carcinogenic risks, priority pollutants, favorable and unfavorable meteorological conditions, forecasting the level of environmental safety, sanitary protection zone.

## BIBLIOGRAPHY

1. State report. «On the state of sanitary and epidemiological well-being of the population in the city of Moscow in 2021» [Electronic resource] / Rospotrebnadzor: website. URL: <https://77.rosпотребнадзор.ru/index.php>

doc/infdoc/10802-gosudarstvennyj-doklad-o-sostoyanii-sanitano-epidemiologicheskogo-blagopoluchiya-naseleniya-v-gorode-moskve-v-2021-godu (access date: 04/01/2024).

2. State report. «On the state of sanitary and epidemiological well-being of the population in the city of Moscow in 2022» [Electronic resource] / Rospotrebnadzor: website. URL: <https://77.rosпотребнадзор.ru/index.php/doc/infdoc/11800-gosudarstvennyj-doklad-o-sostoyanii-sanitano-epidemiologicheskogo-blagopoluchiya-naseleniya-v-gorode-moskve-v-2022-godu> (access date: 04/01/2024).

3. Karakeyan, V.I. Assessment of the environmental tension of the atmosphere of an industrial zone of a knowledge-intensive natural-technical geosystem / V.I. Karakeyan, N.R. Kharlamov, A.S. Ryabyshenkov // Fundamental and applied problems of technology and technology. – 2023. – No. 5(361). – P. 91-98.

4. Kharlamov, N. R. Assessment of the expected environmental risk when increasing the scale of production of microelectronics products / N. R. Kharlamov, A. S. Ryabyshenkov, V. I. Karakeyan // Devices. – 2023. – No. 2(272). – P. 47-54.

5. Boldyreva, O. N. Organization of sanitary protection zones depending on the hazard class of the enterprise / O. N. Boldyreva, V. M. Uskov // Problems of ensuring safety during liquidation of the consequences of emergency situations. – 2014. – No. 1(3). – P. 15-18.

6. Prosviryakova, I. A. Assessing the risk to public health when justifying sanitary protection zones of sewage treatment facilities / I. A. Prosviryakova, E. V. Drozdova, A. E. Pshegoda [and others] // Advanced technologies in systems drainage of populated areas: Proceedings of the international scientific and practical conference, Minsk, February 12–13, 2020. – Minsk: Belarusian State Technological University, 2020. – P. 141-144.

7. Polzik, E. V. Methodological problems of industrial ecology / E. V. Polzik, I. L. Manzhurov, V. S. Kazantsev, V. L. Lezhnin // Ecology of urbanized territories. – 2013. – No. 2. – P. 23-29.

8. Uncertainties associated with chemical-analytical support for assessing the risk for public health / N.V. Zaitseva, P.Z. Shur, N.G. Atiskova, A.T. Sharifov // Population health and habitat - ZNiSO. – 2010. – No. 4(205). – P. 4-7.

9. Valeeva, E. R. Assessment of risk levels of non-carcinogenic effects in adolescents under exposure to polluted atmospheric air / E. R. Valeeva, G. A. Ismagilova, A. I. Ziyatdinova // Current issues of risk analysis in ensuring sanitary and epidemiological well-being of the population and protection of consumer rights: Materials of the IX All-Russian scientific and practical conference with international participation, Perm, May 15–16, 2019. – Perm: Perm National Research Polytechnic University, 2019. – P. 394-401.

10. Hygienic assessment of carcinogenic and non-carcinogenic risks of chemical substances in atmospheric air G. Bratsk / L. P. Ignatjeva, L. V. Vorobyova, I. G. Pogorelova [etc.] // Bulletin of the St. Petersburg State Medical Academy named after. I. I. Mechnikov. – 2005. – T. 6, No. 2. – P. 73-76.

11. Efremov, A. A. Application of geographic information systems in assessing the non-carcinogenic risk to the health of the population of cities of the Russian Federation due to atmospheric air pollution / A. A. Efremov // Meteorological Bulletin. – 2018. – T. 10, No. 1. – P. 52-71.

12. Alekseev, V. V. Classification of geotaxa according to the degree of carbon impact / V. V. Alekseev, N. V. Orlova, R. E. Vavilov, V. S. Bryzgalo // International Conference on Soft Computing and Measurements. – 2022. – T. 1. – P. 215-217.

13. Kurakina, N. I. Assessment of the ecological state of the territory based on a geoinformation model / N. I. Kurakina, A. R. Gabidinova // Bulletin of the Pacific State University. – 2014. – No. 3(34). – P. 55-62.

14. Zaalishvili, V. B. Development of carcinogenic risk index maps for the territory of Vladikavkaz / V. B. Zaalishvili, O. G. Burdzieva, A. S. Kanukov, L. V. Dzobelova // Geology and Geophysics of the South of Russia. – 2021. – T. 11, No. 4. – P. 147-160.

**Ganina Elizaveta Alexandrovna**

National Research University MIET,  
Master's student 1st year of study,  
124498, Moscow, Zelenograd, pl.  
Shokina, house 1  
Phone: 89160019667  
E-mail: liza.ganina.2016@mail.ru

**Riabyshenkov Andrey Sergeevich**

National Research University MIET,  
Doctor of Technical Sciences,  
Professor,  
Professor at the PMT Institute  
124498, Moscow, Zelenograd, pl.  
Shokina, house 1  
Phone: 89164045946  
E-mail: ryabyshenkov@mail.ru

**Kharlamov Nikolay Romanovich**

National Research University MIET,  
2nd year graduate student,  
124498, Moscow, Zelenograd, pl.  
Shokina, house 1  
Phone: 89773982786  
E-mail: KharlamovNR@yandex.ru

**Karakeyan Valery Ivanovich**

National Research University MIET,  
Doctor of Technical Sciences,  
Professor,  
Professor at the PMT Institute  
124498, Moscow, Zelenograd, pl.  
Shokina, house 1  
Phone: 89162453229  
E-mail: zelikar@mail.ru

**Chudakova Maria Alexandrovna**

National Research University MIET,  
Master's student 2nd year of study,  
124498, Moscow, Zelenograd, pl.  
Shokina, house 1  
Phone: 89154864699  
E-mail: marychudo86@gmail.com

**Kolupaev Ivan Alexandrovich**

National Research University MIET,  
Bachelor 4th year of study,  
124498, Moscow, Zelenograd, pl.  
Shokina, house 1  
Phone: 89304712561  
E-mail: ivan.kolupaev@yandex.ru

# **КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА, ИСПЫТАНИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ**

УДК 629.7.05.61: 629.7.054.44

DOI: 10.33979/2073-7408-2024-365-3-142-150

Е.С. ЕФРЕМОВА, В.В. СОЛДАТКИН, В.М. СОЛДАТКИН

## **МОДЕЛИ И АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ КАНАЛОВ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ВОЗДУШНЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ НАБЕГАЮЩЕГО ПОТОКА**

**Аннотация.** Отмечена важность информации о воздушных параметрах движения летательного аппарата (ЛА) относительно окружающей воздушной среды при решении задач пилотирования, автоматического управления и обеспечения безопасности движения, а том числе малоразмерных ЛА, получаемых все более широкое применение и развитие. При этом сложность конструкции, значительная масса и стоимость традиционных для самолетов и других объектов авиационной техники информационно-измерительных систем воздушных сигналов с распределенными по фюзеляжу приемниками и датчиками информации о параметрах набегающего воздушного потока, связанных с бортовым вычислителем, ограничивает их применение на малоразмерных ЛА различного класса и назначения, что определяет перспективность информационно-измерительной системы на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего воздушного потока с одним интегрированным неподвижным приемником первичной информации в виде частотных информативных сигналов, обрабатываемых во встроенным вычислителе.

Рассмотрены причины, разработаны аналитические модели, проведен расчет и анализ соответствия современным требованиям инструментальных погрешностей каналов информационно-измерительной системы воздушных сигналов на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего воздушного потока, обусловленных погрешностью используемого датчика абсолютного давления, погрешностью каналов выделения и преобразования частотных информативных сигналов, а также погрешностью вычисления. Показано, что инструментальные погрешности измерительных каналов рассматриваемой системы при выборе отечественного датчика абсолютного давления, элементной базы ультразвуковых измерительных каналов и встроенного вычислителя соответствуют предъявляемым требованиям без дополнительных мероприятий по их уменьшению.

Раскрывается методика, получены аналитические модели, проведен расчет и анализ методических аэродинамических погрешностей измерительных каналов рассматриваемой информационно-измерительной системы воздушных сигналов, обусловленныхискажением невозмущенного набегающего воздушного потока при движении ЛА и обтекании фюзеляжа с расположенным на его поверхности интегрированным приемником. Предложены эффективные направления уменьшения систематических и случайных составляющих методических погрешностей измерительных каналов рассматриваемой системы.

Полученные результаты подтверждают конкурентные преимущества применения информационно-измерительной системы воздушных сигналов на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего воздушного потока на малоразмерных летательных аппаратах различного класса и назначения.

**Ключевые слова:** летательный аппарат, движение, воздушные сигналы, информационно-измерительная система, контроль, набегающий поток, ультразвуковой метод, погрешности, инструментальные, методические, аналитические модели, расчет, анализ, уменьшение.

### **Введение**

При решении задач пилотирования, автоматического управления и обеспечения безопасности полета летательных аппаратов (ЛА) различного класса и назначения широко используется информация об истинной воздушной скорости и аэродинамических углах атаки и скольжения, барометрической высоте и вертикальной скорости, приборной скорости и числе Маха, других воздушных сигналах, определяющих аэродинамику и динамику движения, относительно окружающей воздушной среды [1 – 3].

Расширение области применения и круга задач, решаемых малоразмерными пилотируемыми, беспилотными и дистанционно-пилотируемыми ЛА, а также значительная сложность, масса и стоимость традиционных для авиационной техники систем воздушных сигналов с распределенными по фюзеляжу приемниками воздушных давлений, температуры торможения и флюгерными датчиками направления набегающего воздушного потока, подключенных к бортовому вычислителю [4, 5], ограничивают их применение на малоразмерных ЛА. Это определяет перспективность разработки и исследования характеристик системы воздушных сигналов, построенной на базе датчика вектора воздушной

скорости летательного аппарата на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего воздушного потока [6]. Ниже проводится исследование инструментальных и методических погрешностей измерительных каналов информационно-измерительной системы воздушных сигналов на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего воздушного потока, оценка их соответствия современным требованиям.

**Аналитические модели и анализ инструментальных погрешностей ультразвуковых измерительных каналов информационно-измерительной системы воздушных сигналов.**

Ультразвуковые измерительные каналы рассматриваемой системы построены на основе ультразвукового датчика вектора истинной воздушной скорости [6]. Поэтому инструментальные погрешности ультразвуковых измерительных каналов рассматриваемой информационно-измерительной системы в основном обусловлены погрешностями используемого ультразвукового датчика. Как показано в работе [7], при формировании выходных сигналов датчика реализуются аналитические модели определения истинной воздушной скорости  $V_B$ , угла скольжения  $\beta$  и угла атаки  $\alpha$  вида

$$V_B = \frac{L}{2} \sqrt{\Delta f_1^2 + \Delta f_2^2}; \quad \beta = K_i \frac{\pi}{2} \operatorname{arctg} \frac{\Delta f_1 - \Delta f_2}{\Delta f_1 + \Delta f_2}; \quad \alpha = \operatorname{arctg} \frac{\Delta f_3 - \Delta f_4}{\Delta f_3 + \Delta f_4}, \quad (1)$$

где  $L$  – расстояние между излучателями, генерирующими ультразвуковые колебания с частотами  $f_1, f_2, f_3, f_4$  и  $f'_1, f'_2, f'_3, f'_4$  распространения их от излучателей И1, И2, И3, И4 до приемников П1, П2, П3, П4 по направлению контролируемого набегающего воздушного потока и от источников И'1, И'2, И'3, И'4 до приемников П'1, П'2, П'3, П'4 – против направления набегающего потока;

$\Delta f_1 = f_1 - f'_1$ ,  $\Delta f_2 = f_2 - f'_2$  – информативные разности частот приемников П1, П'1, П2, П'2 ультразвуковых колебаний, расположенных в плоскости изменения угла скольжения  $\beta$ ;

$\Delta f_3 = f_3 - f'_3$ ,  $\Delta f_4 = f_4 - f'_4$  – информативные разности частот приемников П3, П'3, П4, П'4, расположенных в плоскости изменения угла атаки  $\alpha$ ;

$K_i \frac{\pi}{2}$  – множитель, определяющий диапазон изменения угла скольжения (при  $-45^\circ \leq \beta \leq 45^\circ$   $K_i = 0$ ; при  $45^\circ \leq \beta \leq 135^\circ$   $K_i = 1$ ; при  $135^\circ \leq \beta \leq 225^\circ$   $K_i = 2$ ; при  $-45^\circ \leq \beta \leq -135^\circ$   $K_i = -1$ ).

Из выражений (1) видно, что инструментальная погрешность  $\Delta V_B$  определения истинной воздушной скорости обусловлена технологическим допуском  $\pm \Delta L$  на расстояние между излучателями и приемниками ультразвуковых колебаний, погрешностями  $\Delta(\Delta f_1)$  и  $\Delta(\Delta f_2)$  измерения разности частот  $f_1$  и  $f'_1$ ,  $f_2$  и  $f'_2$ , распространяемые по направлению потока и против потока, а также погрешностью  $\Delta_B$  реализации вычислителем аналитической модели определения истинной воздушной скорости. Принимая, что  $\Delta(\Delta f_1) = \Delta(\Delta f_2) = \Delta(\Delta f)$ , получим аналитическую модель для расчета инструментальной погрешности  $\Delta V_B$  определения истинной воздушной скорости вида

$$\Delta V_B = \pm \frac{\Delta L}{2} V_B + \frac{(\Delta f_1 + \Delta f_2)}{\sqrt{\Delta f_1^2 + \Delta f_2^2}} \Delta(\Delta f) + \Delta_B. \quad (2)$$

При  $\Delta(\Delta f_1) = \Delta(\Delta f_2) = \Delta(\Delta f)$ , используя линейное приближение, аналитические модели для инструментальных погрешностей определения угла скольжения и угла атаки получены в виде

$$\Delta \beta = K_i \frac{\pi}{2} \frac{(\Delta f_1 + \Delta f_2)^3}{(\Delta f_1^2 + \Delta f_2^2)^2} \Delta(\Delta f) + \Delta_B; \quad \Delta \alpha = \frac{(\Delta f_3 + \Delta f_4)^3}{(\Delta f_3^2 + \Delta f_4^2)^2} \Delta(\Delta f) + \Delta_B. \quad (3)$$

Как показывают полученные аналитические модели (2) и (3), инструментальные погрешности ультразвуковых измерительных каналов информационно-измерительной системы в значительной степени определяются погрешностями вычисления, в каналах

которого определяются частоты  $f_1$  и  $f'_1$ ,  $f_2$  и  $f'_2$ ,  $f_3$  и  $f'_3$ ,  $f_4$  и  $f'_4$ , их разности  $\Delta f_1$ ,  $\Delta f_2$ ,  $\Delta f_3$ ,  $\Delta f_4$  и реализации аналитических моделей вычисления  $V_B$ ,  $\beta$  и  $\alpha$ . При соответствующем выборе программного обеспечения указанные инструментальные погрешности будут сравнительно малы. Используя результаты разработки двухкомпонентного комбинированного ультразвукового датчика скорости направления ветра LA-1647 [8], конструкция которого подобна панорамному ультразвуковому датчику аэродинамического угла и истинной воздушной скорости рассматриваемой информационно-измерительной системы, по инструментальным погрешностям датчика LA-1647 можно оценить инструментальную погрешность канала истинной воздушной скорости ультразвукового измерительного канала значением  $\Delta V_B \leq \pm 1,0$  км/ч, инструментальную погрешность канала угла скольжения в диапазоне  $\pm 180^\circ$  – оценить значением  $\Delta \beta_i \leq \pm 0,5^\circ$ , инструментальную погрешность канала угла атаки в диапазоне  $\pm 40^\circ$  – оценить значением  $\Delta \alpha_i \leq \pm 0,25^\circ$ .

**Аналитические модели и расчет инструментальных погрешностей высотно-скоростных измерительных каналов информационно-измерительной системы на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего воздушного потока.**

Как показано в работе [10], первичной информацией высотно-скоростного измерительного канала информационно-измерительной системы является статическое давление  $P_H$  на данной высоте полета  $H$ , воспринимаемой плиточным приемником на обтекаемой скользящим потоком поверхности.

Абсолютная (барометрическая) высота  $H$  информационно-измерительной системы определяется для высот до 11000 м аналитической моделью стандартной атмосферы вида [9, 10]

$$H = \frac{T_0}{\tau} \left[ 1 - \left( \frac{P_H}{P_0} \right)^{\tau R} \right], \quad (4)$$

где  $T_0$  и  $P_0$  – абсолютная температура и давление на высоте  $H=0$ ;

$\tau$  и  $R$  – температурный градиент и газовая постоянная.

Инструментальная погрешность  $\Delta H_i$  измерения барометрической высоты обусловлена погрешностью  $\Delta P_H$  датчика абсолютного давления, вход которого связан с приемником статического давления, а выход подключен ко входу вычислителя, реализующего аналитическую модель (4) и определяющую высоту  $H$ .

Связь инструментальной погрешности  $\Delta H_i$  измерения барометрической высоты  $H$  и погрешности  $\Delta P_H$  датчика абсолютного давления определяется аналитической моделью вида

$$\Delta H_i = \frac{dH}{dP_H} \Delta P_H = -\frac{T_0 R}{P_0} \left( \frac{P_H}{P_0} \right)^{R\tau-1} \Delta P_H = -\frac{T_0 R}{P_0^{\tau R}} \frac{1}{P_H^{1-\tau R}} \Delta P_H. \quad (5)$$

Подставляя численные значения  $T_0 = 288,15$  К,  $P_0 = 101325$  Па,  $\tau = 0,0065$  К/м,  $R = 29,27125$  м/К, выражение (5) приводится к виду

$$\Delta H_i = -935,738 \frac{1}{P_H^{0,809737}} \Delta P_H = -935,738 P_H^{0,190263} \delta P_H, \quad (6)$$

где  $\delta P_H$  – относительная погрешность датчика абсолютного давления.

Как показали расчеты, при полете в диапазоне высот от 0 до 7000 м статическое давление  $P_H$  изменяется от 101325 Па до 41105,3 Па и расчетное значения инструментальной погрешности канала измерения барометрической высоты изменяется от  $\Delta H_i = 0,838$  м до  $\Delta H_i = 0,712$  м. При использовании в качестве датчика абсолютного давления отечественных датчиков ДДГ, ДДЧП, ДДГМ [10], имеющих относительную среднеквадратическую погрешность  $\delta P_H = 0,01\%$ , максимальное значение канала барометрической высоты информационно-измерительной системы воздушных сигналов на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего воздушного потока будет определяться величиной  $\Delta H_{i\max} = \pm 3\sigma_{\Delta H_i} = \pm 2,5$  м.

При определении инструментальной погрешности канала приборной скорости рассматриваемой информационно-измерительной системы используется связь приборной  $V_{\text{пр}}$  и истинной воздушной  $V_{\text{B}}$  скорости вида [11]

$$V_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{P_H T_0}{P_0 T_H}} V_{\text{B}}. \quad (7)$$

Тогда при известной инструментальной погрешности  $\Delta V_{\text{B и}}$  измерения истинной воздушной скорости ультразвукового измерительного канала инструментальная погрешность определения приборной скорости без учета погрешности вычислителя можно оценить аналитической моделью вида

$$\Delta V_{\text{пр и}} = \sqrt{\frac{P_H T_0}{P_0 T_H}} \Delta V_{\text{B и}}. \quad (8)$$

После подстановки численных значений  $T_0$  и  $P_0$ , получим

$$\Delta V_{\text{пр и}} = \sqrt{0,284 \cdot 10^{-2} \frac{P_H}{T_H}} \Delta V_{\text{B и}}. \quad (9)$$

Как показали расчеты, при значении инструментальной погрешности ультразвукового канала истинной воздушной скорости  $\Delta V_{\text{B и}} = \pm 1,0 \text{ км/ч}$  при значении барометрической высоты  $H=0$  инструментальная погрешность канала приборной скорости оценивается максимальным значением  $\Delta V_{\text{пр и max}} = \pm 3,7 \text{ км/ч}$ , при  $H=7000 \text{ м}$  – уменьшается до  $\Delta V_{\text{пр и max}} = \pm 2,56 \text{ км/ч}$ .

При определении инструментальной погрешности канала измерения числа Маха рассматриваемой информационно-измерительной системы воспользуемся связью числа Маха и истинной воздушной скоростью  $V_{\text{B}}$  вида [12]

$$M = \frac{V_{\text{B}}}{\sqrt{kgRT_H}}. \quad (10)$$

Тогда в первом приближении аналитическую модель для определения инструментальной погрешности  $\Delta M_{\text{и}}$  канала числа  $M$  можно представить в виде

$$\Delta M_{\text{и}} = \frac{\partial M}{\partial V_{\text{B}}} \Delta V_{\text{B и}} + \frac{\partial M}{\partial T_H} \Delta T_{H \text{ и}} = \frac{1}{\sqrt{kgRT_H}} \Delta V_{\text{B и}} + \frac{V_{\text{B}}}{2\sqrt{kgR}} \Delta T_{H \text{ и}}. \quad (11)$$

При подстановке численных значений входящих параметров, получим

$$\Delta M_{\text{и}} = \frac{0,04}{\sqrt{T_H}} \Delta V_{\text{B и}} + \frac{0,02V_{\text{B}}}{T_H} \Delta T_{H \text{ и}}. \quad (12)$$

Используя полученные выше значения инструментальных погрешностей канала истинной воздушной скорости  $\Delta V_{\text{B и}} = \pm 1,0 \text{ км/ч}$  ( $\pm 0,3 \text{ м/с}$ ) и канала измерения температуры наружного воздуха  $\Delta T_{H \text{ и}} = \pm 1,0^\circ$ , расчетное значение инструментальной погрешности канала измерения числа Маха информационно-измерительной системы воздушных сигналов на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего воздушного потока при  $H=0$  и  $V_{\text{B}} = 50 \text{ км/ч}$  не превышает значение  $\Delta M_{\text{и}} = 6,6 \cdot 10^{-3}$ , при  $H=7000 \text{ м}$  и  $V_{\text{B}} = 800 \text{ км/ч}$  –  $\Delta M_{\text{и}} = 68 \cdot 10^{-3}$ .

Как показывает анализ, расчетные значения инструментальных погрешностей каналов информационно-измерительной системы воздушных сигналов на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего воздушного потока в диапазоне высот от 0 до 7000 м и истинной воздушной скорости от 50 до 800 км/ч соответствуют современным требованиям без дополнительных мероприятий по повышению инструментальной точности измерительных каналов.

**Причины, аналитические модели и анализ методических погрешностей измерительных каналов информационно-измерительной системы воздушных сигналов на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего воздушного потока.**

Причиной методических аэродинамических погрешностей определения воздушных сигналов, определяющих движение ЛА относительно набегающего воздушного потока является отклонение воспринимаемого отверстием-приемником местного статического давления  $P_m$  от статического давления  $P_H$  невозмущенного набегающего воздушного потока.

Из-за возмущения набегающего воздушного потока, вносимого движением и обтеканием фюзеляжа летательного аппарата, давление  $P_m$  в месте расположения отверстия-приемника на поверхности ультразвукового датчика отличается от статического давления  $P_H$  невозмущенного набегающего воздушного потока на величину аэродинамического искажения  $\Delta P_a$  и определяется следующим образом:

$$P_m = P_H + \Delta P_a = P_H + K_p q; \quad \Delta P_a = K_p q, \quad (13)$$

где  $K_p = P_m/q$  – безразмерный коэффициент местного статического давления, в общем случае зависящий от скорости  $V_B$ , углов атаки  $\alpha$  и скольжения  $\beta$  ЛА и определяемый при летных испытаниях системы на конкретном типе ЛА для конкретного места установки ультразвукового датчика на всех характерных режимах полета.

Тогда барометрическая высота полета  $H_m$ , определяемая в измерительном канале информационно-измерительной системы воздушных сигналов по давлению  $P_m$ , в соответствии со стандартной зависимостью [9] в диапазоне высот до 11000 м будет определяться по соотношениям

$$H_m = \frac{T_0}{\tau} \left[ 1 - \left( \frac{P_m}{P_0} \right)^{\tau R} \right] = \frac{T_0}{\tau} \left[ 1 - \left( \frac{P_H}{P_0} \right)^{\tau R} \right] + \left( \frac{T_0}{\tau} \frac{\Delta P_a}{P_0} \right)^{\tau R} = H + \Delta H_a, \quad (14)$$

$$\Delta H_a = \left( \frac{T_0}{\tau} \frac{\Delta P_a}{P_0} \right)^{\tau R} = \left( \frac{T_0}{\tau} \frac{K_p \rho_H V_B^2}{2P_0} \right)^{\tau R},$$

где  $\Delta H_a = H_m - H$  – методическая аэродинамическая погрешность определения барометрической высоты из-за искажения статического давления на поверхности ультразвукового датчика при движении и обтекании фюзеляжа летательного аппарата.

В таблице 1 приведены вычисленные по соотношениям (14) значения методической аэродинамической погрешности  $\Delta H_a$  канала измерения барометрической высоты информационно-измерительной системы воздушных сигналов при изменении значения безразмерного коэффициента местного статического давления от  $K_p = 0,05$  до  $K_p = 0,2$  для различных значений скорости и высоты полета.

Таблица 1 – Значения методической аэродинамической погрешности

$V_B$ , км/ч	$\Delta H_a$ , м											
	$H=0$			$H=1000$			$H=3000$			$H=7000$		
	$K_p$		$K_p$		$K_p$		$K_p$		$K_p$		$K_p$	
	0,05	0,1	0,2	0,05	0,1	0,2	0,05	0,1	0,2	0,05	0,1	0,2
50	1,19	1,36	1,55	0,77	0,88	1,00	0,77	0,88	1,00	0,77	0,88	1,00
100	1,55	1,77	2,03	1,00	1,14	1,31	1,00	1,14	1,31	1,00	1,14	1,31
200	2,03	2,31	2,64	1,31	1,49	1,70	1,31	1,49	1,70	1,31	1,49	1,70
400	2,64	3,01	3,44	1,70	1,94	2,22	1,70	1,94	2,22	1,70	1,94	2,22
600	3,08	3,51	4,01	1,99	2,27	2,59	1,99	2,27	2,59	1,99	2,27	2,59
800	3,44	3,92	4,47	2,22	2,53	2,89	2,22	2,53	2,89	2,22	2,53	2,89

При изменении коэффициента местного статического давления от регламентируемого

нормами летной годности (НЛГС) самолетов значения [13]  $K_p = 0,05$  до  $K_p = 0,2$  расчетная методическая аэродинамическая погрешность  $\Delta H_a$  канала измерения барометрической высоты в диапазоне высот 0...7000 м при дозвуковых скоростях полета исследуемой системы изменяется от  $\Delta H_{a\ min} = 0,75...2,5$  м до от  $\Delta H_{a\ max} = 2,9...4,8$  м.

Отклонение местного статического давления  $P_m$ , воспринимаемого на обтекаемой поверхности панорамного датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости, от статического давления  $P_H$  невозмущенного набегающего воздушного потока также является причиной методической аэродинамической погрешности канала приборной скорости информационно-измерительной системы воздушных сигналов на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего потока.

Приборная скорость, вычисляемая по местному статическому давлению  $P_m$  в канале информационно-измерительной системы воздушных сигналов, будет определяться соотношением

$$\begin{aligned} V_{\text{пр}}^{P_m} &= \sqrt{2gRT_0\left(\frac{k}{k-1}\right)\left[\left(\frac{\rho_0 T_0}{2P_0^2 T_H} V_B^2 (P_H + \Delta P_a) + 1\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right]} = \\ &= \sqrt{2gRT_0\left(\frac{k}{k-1}\right)\left[\left(\frac{\rho_0 T_0 P_H}{2P_0^2 T_H} V_B^2 (1 + K_p) + 1\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right]}, \end{aligned} \quad (15)$$

Тогда методическая аэродинамическая погрешность  $V_{\text{пр}}^{P_m}$  определения приборной скорости в месте установки ультразвукового датчика будет определяться выражением вида

$$\begin{aligned} \Delta V_{\text{пр}}^{P_m} &= V_{\text{пр}}^{P_m} - V_{\text{пр}} = \sqrt{2gRT_0\left(\frac{k}{k-1}\right)\left[\left(\frac{\rho_0 T_0 P_H}{2P_0^2 T_H} V_B^2 (1 + K_p) + 1\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right]} - \\ &\quad - \sqrt{2gRT_0\left(\frac{k}{k-1}\right)\left[\left(\frac{\rho_0 T_0 P_H}{2P_0^2 T_H} V_B^2 + 1\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right]}. \end{aligned} \quad (16)$$

Расчетные значения аэродинамической погрешности  $\Delta V_{\text{пр}}^{P_m}$  канала приборной скорости информационно-измерительной системы воздушных сигналов, обусловленной отличием местного статического давления  $P_m$ , воспринимаемого на обтекаемой поверхности ультразвукового датчика, от статического давления  $P_H$  невозмущенного набегающего воздушного потока (при регламентируемом нормами летной годности самолетов значении  $K_p = 0,05$  в диапазоне высот 0...7000 м и скорости полета от 50 до 800 км/ч изменяются от 1,26 км/ч до 28,188 км/ч, т.е. составляют примерно 0,16–3,5 % от величины истинной воздушной скорости. При увеличении  $K_p$  значения методической аэродинамической погрешности  $\Delta V_{\text{пр}}^{P_m}$  пропорционально увеличиваются.

Разработанный подход можно использовать и при оценке методической аэродинамической погрешности канала измерения числа Маха разрабатываемой информационно-измерительной системы воздушных сигналов.

Полученные результаты позволяют обоснованно решать задачи обеспечения точности каналов измерения барометрической высоты, приборной скорости и числа Маха информационно-измерительной системы воздушных сигналов на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего потока.

Разработаны технологии летных испытаний бортового оборудования самолетов, вертолетов и других летательных аппаратов с применением комплекса бортовых траекторных измерений [14], в том числе технология определения методических аэродинамических погрешностей приемников воздушных давлений и систем измерения воздушных сигналов [15]. Использование указанных технологий позволит с достаточно высокой достоверностью определить систематические составляющие методических аэродинамических погрешностей в измерительных каналах информационно-измерительной системы воздушных сигналов на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего потока на всех характерных режимах полета с последующим их учетом в виде аэродинамических поправок, которые заносятся в память вычислителя и используются для коррекции систематических составляющих методических аэродинамических погрешностей измерительных каналов разрабатываемой системы.

Случайные составляющие методических аэродинамических погрешностей измерительных каналов информационно-измерительной системы воздушных сигналов на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего потока оцениваются по результатам летных испытаний на конкретном типе летательного аппарата и учитываются аналогично другим типам систем воздушных сигналов летательного аппарата, в том числе реализацией принципов комплексирования [16, 17].

### Заключение

Таким образом, разработанные аналитические модели, проведенные расчеты и анализ инструментальных погрешностей измерительных каналов в рабочем диапазоне скоростей и высот полета свидетельствует о соответствии точности информационно-измерительной системы воздушных сигналов на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего воздушного потока современным требованиям.

Разработанные модели, полученные оценки и рассмотренные пути уменьшения составляющих методической аэродинамической погрешности измерительных каналов разрабатываемой информационно-измерительной системы, обусловленных искажением статического давления, воспринимаемого на обтекаемой скользящей поверхности ультразвукового датчика истинной воздушной скорости и аэродинамических углов атаки и скольжения позволяют обеспечить погрешности каналов измерения барометрической высоты, истинной воздушной и приборной скоростей, числа Маха и других воздушных параметров близкими к погрешностям каналов традиционных информационно-измерительных систем воздушных сигналов на основе аэрометрического метода контроля параметров набегающего воздушного потока.

Один интегрированный неподвижный приемник первичной информации с частотными информативными сигналами, чисто электронная многоканальная измерительная схема и встроенный вычислитель, формирующий цифровые выходные сигналы существенно упрощают конструкцию, снижают массу и стоимость, расширяют область применения информационно-измерительной системы воздушных сигналов на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего воздушного потока, в том числе на малоразмерных пилотируемых, беспилотных и дистанционно-пилотируемых ЛА различного класса и назначения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филатов Г.А. Безопасность полетов в возмущенной атмосфере / Г.А. Филатов, Г.С. Пуминова, П.В. Сильвестров. – М.: Транспорт. – 1992. – 272с.
2. Синяков А.Н. Системы автоматического управления ЛА и их силовыми установками / А.Н. Синяков, Ф.А. Шаймарданов. – М.: Машиностроение. – 1991. – 320с.
3. Солдаткин В.М. Методы и средства измерения аэродинамических углов летательных аппаратов / В.М. Солдаткин. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. – 2001. – 448 с.
4. Клюев Г.И. Измерители аэродинамических параметров летательных аппаратов / Г.И. Клюев, Н.Н. Макаров, В.М. Солдаткин, И.П. Ефимов / Под ред. В.А. Мишина. – Ульяновск: Изд-во УлГТУ. – 2005. – 509 с.
5. Солдаткин В.М. Авиационные приборы, измерительно-вычислительные системы и комплексы: Принципы построения, алгоритмы обработки информации, характеристики и погрешности: Учебное пособие / В.М. Солдаткин, Ф.А. Ганеев, В.В. Солдаткин, А.В. Никитин; под ред. д-ра техн. наук, проф. В.М. Солдаткина. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. – 2014. – 526с.
6. Мицхахов Б.И. Модели и анализ методических погрешностей панорамного датчика аэродинамического угла и воздушной скорости с неподвижным приемником и ультразвуковыми каналами / Б.И. Мицхахов, В.М. Солдаткин, Е.С. Ефремова, А.В. Никитин, В.В. Солдаткин // Известия вузов. Авиационная

техника. – 2023. – № 1. – С. 110-114.

7. Мифтахов Б.И. Анализ точности электронной системы пространственного измерения воздушных параметров движения летательного аппарата с неподвижным приемником набегающего потока / Б.И. Мифтахов, В.М. Солдаткин, В.В. Солдаткин, Е.С. Ефремова, А.В. Никитин // Известия вузов. Авиационная техника. – 2023. – № 3. – С. 127-134.

8. Комбинированный ультразвуковой датчик скорости и направления ветра LA-1647 [Электронный ресурс]. Фирма ООО «Полтраф». Режим доступа: [https://poltraf.ru/hallyudatelnye\\_stant\\_ii\\_kompleksy/datchiki\\_skorosti\\_napravleniya\\_vetra/ultrazvyk/la1647/](https://poltraf.ru/hallyudatelnye_stant_ii_kompleksy/datchiki_skorosti_napravleniya_vetra/ultrazvyk/la1647/)

9. ГОСТ 4401-81. Атмосфера стандартов. Параметры. М.: Изд-во Стандартов. 1981. 179 с.

10. Боднер В.А. Приборы первичной информации / В.А. Боднер. – М.: Машиностроение. – 1981. – 344 с.

11. Системотехническое проектирование измерительно-вычислительных систем: Учебное пособие / под ред. проф. В.М. Солдаткина. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. – 2011. – 150с.

12. Браславский Д.А. Приборы и датчики летательных аппаратов / Д.А. Браславский. – М: Машиностроение. – 1970. – 392 с.

13. Авиационные правила 4.25 Нормы летной годности самолетов транспортной категории. – М.: Издание Международного авиационного комитета. – 1994. – 321с.

14. Харин Е.Г. Технология летных испытаний бортового оборудования летательных аппаратов с применением комплекса бортовых траекторных измерений / Е.Г. Харин, И.А. Копылов. – М.: МАИ-ПРИНТ. – 2012. – 360с.

15. Пушкин С.Г. Технология определения аэродинамических погрешностей ПВД и воздушных параметров в летных испытаниях ЛА с использованием спутниковых средств измерений / С.Г. Пушкин, Е.Г. Харин, В.Р. Кожурин, В.Г. Захаров // ВИНИТИ. Информационный сборник «Проблемы безопасности полетов». – 2016. – Вып. 7. – С. 24-38.

16. Иванов Ю.П. Комплексирование информационно-измерительных устройств летательных аппаратов / Ю.П. Иванов, А.Н. Синяков, И.В. Филатов. – Л.: Машиностроение. – 1984. – 208с.

17. Браславский Д.А. Точность измерительных устройств / Д.А. Браславский, В.В. Петров. – М.: Машиностроение. – 1976. – 312с.

**Ефремова Елена Сергеевна**  
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань, Доцент кафедры электронного приборостроения и менеджмента качества 420111, г.Казань, ул. К.Маркса, д. 10 тел. 8(843)231-03-60  
E-mail: soldatkina1991@bk.ru

**Солдаткин Вячеслав Владимирович**  
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань, Профессор кафедры электронного приборостроения и менеджмента качества 420111, г.Казань, ул. К.Маркса, д. 10 тел. 8(843)231-03-60  
E-mail: w-soldatkin@mail.ru

**Солдаткин Владимир Михайлович**  
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань, Профессор кафедры электронного приборостроения и менеджмента качества 420111, г.Казань, ул. К.Маркса, д. 10 тел. 8(843)231-03-60  
E-mail: w-soldatkin@mail.ru

E.S. EFREMOVA, V.V. SOLDATKIN, V.M. SOLDATKIN

## MODELS AND ERROR ANALYSIS OF CHANNELS OF THE INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM OF AIR SIGNALS BASED ON THE ULTRASONIC METHOD OF MONITORING THE PARAMETERS OF THE INCOMING FLOW

**Abstract.** The importance of information on the air parameters of the aircraft movement relative to the surrounding air environment in solving the tasks of piloting, automatic control and traffic safety, including small-sized aircraft, which are becoming more widely used and developed, was noted. At the same time, the complexity of the design, the significant weight and cost of traditional aircraft and other aviation equipment information and measurement systems of air signals with receivers and sensors distributed over the fuselage of information about the parameters of the incoming airflow associated with the on-board computer limits their use on small-sized aircraft of various classes and purposes, which determines the prospects of the information and measurement system based on the ultrasonic method of monitoring the parameters of the incoming air flow with one integrated fixed receiver of primary information in the form of frequency informative signals processed in the built-in.

The reasons are considered, analytical models are developed, calculation and analysis of compliance with modern requirements of instrumental errors of channels of the information and measurement system of air signals based on the ultrasonic method of monitoring the parameters of the incoming air flow due to the error of the absolute pressure sensor used, the error of the channels of isolation and conversion of frequency informative signals, as well as the error of calculation. It is shown that the instrumental errors of the measuring channels of the considered system when choosing

a domestic absolute pressure sensor, the element base of ultrasonic measuring channels and an integrated computer meet the requirements without additional measures to reduce them.

The methodology is disclosed, analytical models are obtained, calculation and analysis of methodological aerodynamic errors of the measuring channels of the considered information and measurement system of air signals due to distortion of the undisturbed incoming air flow during aircraft movement and flow around the fuselage with an integrated receiver located on its surface is carried out. Effective ways of reducing the systematic and random components of the methodological errors of the measuring channels of the system under consideration are proposed.

The results obtained confirm the competitive advantages of using an information and measurement system of air signals based on an ultrasonic method for monitoring the parameters of the incoming air flow on small-sized aircraft of various classes and purposes.

**Keywords:** aircraft, movement, air signals, information and measurement system, control, incoming flow, ultrasonic method, errors, instrumental, methodological, analytical models, calculation, analysis, reduction.

## BIBLIOGRAPHY

1. Filatov G.A. Bezopastnost poletov v vozmychennou atmosphere / G.A. Filatov, G.S. Pyminova, P.V. Silvestrov. – M.: Transport. – 1992. – 272s.
2. Sinaykov A.N. Sistemy avomaticeskogo upravleniya LA i ix silovymi ustavokami / A.N. Sinaykov, F.A. Shaimardanov. – M: Mashinostroyeniye. – 1991. – 320s.
3. Soldatkin V.M. Metody i sredstva izmerenija ajerodinamicheskikh uglov letatel'nyh apparatov / V.M. Soldatkin. – Kazan': Izd-vo Kazan. gos. tehn. un-ta. – 2001. – 448 s.
4. Kljuev. G.I. Izmeriteli dinamicheskikh parametrov letatel'nyh apparatov / G.I. Kljuev, N.N. Makarov, V.M. Soldatkin, I.P. Efimov: Uchebnoe posobie. Ul'janovsk: Izd-vo Ul'janovsk. gos. tehn. un-t, 2005. – 590 s.
5. Soldatkin V.M. Aviationnye pribory, izmeritel'no-vycheslitel'nye sistemy I kompleksy: Printipsy postroenija, algoritmy obrabotki informatsie, xarakteristiki i pogrechostki: Uchebnoe posobie / V.M. Soldatkin. – Kazan: Izd-vo Kazan. gos. un-ta. – 2014. – 526s.
6. Miftachov B.I. Modeli i analiz metodicheskix pogrechnostey panoramnogo datchika ajerodinamicheskogo ugla i vozdushnoj skorosti s nepodviznim priemnikom i ultrazvukovymi kanalami / B.I. Miftachov, V.M. Soldatkin, V.V. Soldatkin, E.S. Efremova, A.V. Nikitin // Izvestia vyzov. Avictionnay technika. – 2023. – № 1. – S. 110-114.
7. Miftachov B.I. Analyz tochnosti elektronnoy sistemy prostranstvennogo izmerenija vozdushnih parametrov letatel'nogo apparata s nepodviznim priemnikom nabegaucheego notoka / B.I. Miftachov, V.M. Soldatkin, V.V. Soldatkin, E.S. Efremova, A.V. Nikitin // Izvestia vyzov. Avictionnay technika. – 2023. – № 3. – S. 127-134.
8. Kombinirovannuy ultrazvukovoy datchik skorosti i napravleniy veta LA-1647 [Electronnuy resyrs]. Firma OOO «Poltraf». Rezim dostupa: [https://poltraf.ru/hallyudatelnye\\_stant\\_ii\\_kompleksy/datchiki\\_skorosti\\_napravleniya\\_vetra/ultrazvyk/la1647/](https://poltraf.ru/hallyudatelnye_stant_ii_kompleksy/datchiki_skorosti_napravleniya_vetra/ultrazvyk/la1647/)
9. GOST 4401-81. Atmosfera standartnaya. Parametry. – M.: Izd-vo Standartov. – 1981. – 179s.
10. Bodner V.A. Pribozy pervechnoy informacii / V.A. Bodner. – M: Mashinostroyeniye. – 1981. – 344 s.
11. Sistemotekhnicheskoe proektirovanie izmeritel'no-vycheslitel'nyx system: Uchebnoe posobie / pod red. prof. V.M. Soldatkina. – Kazan': Izd-vo Kazan. gos. tehn. un-ta. – 2011. – 150 s.
12. Braslavskiy D.A. Pribozy i datchiki letatelnogo apparata / D.A. Braslavskiy. – M: Mashinostroyeniye. – 1970. – 392s.
13. Aviacionnye pravila 4.25 Normy letnoi godnosti samoletov transportnoy kategorii. – M.: Izdanue Mezdynarodnogo aviacionnogo komiteta. – 1994. – 321 s.
14. Xarin E.G. Technologuy letnix isputaniy bortovogo oborudovania letatelnix apparatov s primeniem kompleksa bortovyx traektornyx izmereniy / E.G. Xarin, I.A. Kopylov. – M.: MAI-PRINT. – 2012. – 360 s.
15. Pushkov S.G. Texnologya aerodinamicheskix pogrechnostey PVD i vozduhnix parametrov v letnix ispitaniyax LA s ispolzovaniem spetnikovuix sredstv izmereniu / S.G. Pushkov, E.G. Xarin, V.R. Kozurin, V.G. Zaxarov // VINITI. Informachionnyi sbornik «Problemy bezopastnosti poletov». – 2016. – Vup. 7. – S. 24-38.
16. Ivanov Ju. P. Kompleksirovanie informacionno-izmeritel'nyx ustroystv letatelnix apparatov / Ju. P. Ivanov, A.N. Sinuakov, I.V. Filatov. – L.: Mashinostroyeniye. – 1984. – 208 s.
17. Braslavskiy D.A. Tochnost izmeritel'nyx ustroystv / D.A. Braslavskiy. – M: Mashinostroyeniye. – 1976. – 312 s.

**Efremova Elena Sergeevna**  
FSBEI HE « Kazan National Research Technical University named after A.N.Tupolev-KAI », Kazan, Associate Professor of Department of Electronic Instrument Making and Quality Management 420111, Kazan, K.Marksa str,10 Ph. 8(843)231-03-60 E-mail: soldatkina1991@bk.ru

**Soldatkin Vyacheslav Vladimirovich**  
FSBEI HE « Kazan National Research Technical University named after A.N.Tupolev-KAI », Kazan, Professor of Department of Electronic Instrument Making and Quality Management 420111, Kazan, K.Marksa str,10 Ph. 8(843)231-03-60 E-mail: w-soldatkin@mail.ru

**Soldatkin Vladimir Mikhailovich**  
FSBEI HE « Kazan National Research Technical University named after A.N.Tupolev-KAI », Kazan, Professor of Department of Electronic Instrument Making and Quality Management 420111, Kazan, K.Marksa str,10 Ph. 8(843)231-03-60 E-mail: w-soldatkin@mail.ru

В.М. СОЛДАТКИН, В.В. СОЛДАТКИН, Е.С. ЕФРЕМОВА, В.С. СОЛДАТКИН

## ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ВОЗДУШНЫХ СИГНАЛОВ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА ОСНОВЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ НАБЕГАЮЩЕГО ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

**Аннотация.** Рассмотрены особенности построения и ограничения по применению широко используемых в авиации информационно-измерительных систем воздушных сигналов, построенных на основе аэрометрического, аэродинамического и флюгерных методов контроля параметров набегающего воздушного потока с помощью распределенных по фюзеляжу автономных датчиков первичной информации и разнесенного вычислителя, формирующего выходные сигналы системы. Разрабатываемые системы воздушных сигналов, построенные на основе вихревого и ионно-меточного методов контроля параметров набегающего потока так же полностью снимают ограничения по применению на сверхлегких и малоразмерных ЛА.

Опыт эффективного использования ультразвукового метода контроля параметров потока газов в расходометрии, метрологии и других областях, определяет перспективность информационно-измерительной системы воздушных сигналов летательного аппарата на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего воздушного потока с одним интегрированным неподвижным приемником первичной информации в виде частотно-временных информативных сигналов, удобных для восприятия, преобразования и обработки во встроенным вычислителем.

Рассмотрены принципы построения, приводится функциональная схема и разработаны аналитические модели обработки информации и определения воздушных сигналов в ультразвуковых и высотно-скоростных измерительных каналов рассматриваемой системы. Приводятся достоинства, обеспечивающие конкурентоспособность применения рассматриваемой информационно-измерительной системы воздушных сигналов на сверхлегких и малоразмерных летательных аппаратах различного назначения.

**Ключевые слова:** летательный аппарат, система воздушных сигналов, информационно-измерительная система, контроль набегающего воздушного потока, ультразвуковой метод, принципы построения, функциональная схема, аналитические модели сигналов, обработка, определение выходных сигналов, конкурентные преимущества системы.

### Введение

Движение широкого класса летательных аппаратов (ЛА) происходит в приземном возмущенном слое атмосферы и для пилотирования и автоматического управления, решения полетных задач необходима информация о воздушных сигналах, определяющих аэродинамику, устойчивость и безопасность движения ЛА в атмосфере [1, 2].

Как показывает анализ [3, 4], широко используемые на самолетах и других объектах авиационной техники информационно-измерительные системы воздушных сигналов, построены на основе аэрометрического, аэродинамического и флюгерного методов контроля параметров набегающего воздушного потока с помощью распределенных по фюзеляжу и вынесенных в набегающий поток приемников полного и статического воздушных давлений, приемников температуры торможения, флюгерных датчиков аэродинамических углов атаки и скольжения, устанавливаемых на правом и левом борту ЛА. Используемые автономные приемники и датчики первичной информации пневмопроводами и электрическими кабелями соединены с бортовым вычислителем, обеспечивающим преобразование и обработку информации, выдачу выходных сигналов информационно-измерительной системы воздушных сигналов в системы отображения информации и другим потребителям. Большое число автономных приемников и датчиков первичной информации, пневмопроводов и кабелей связи, разнесенный вычислитель приводят к усложнению конструкции, увеличению массы и стоимости таких традиционных систем воздушных сигналов, что ограничивает возможность их применения на сверхлегких самолетах и малоразмерных ЛА различного класса и назначения, определяет актуальность разработки информационно-измерительных систем воздушных сигналов, построенных на основе других методов контроля параметров набегающего воздушного потока с одним (интегрированным) неподвижным приемником потока и встроенным вычислителем.

**Принципы построения, достоинства и недостатки информационно-измерительных систем, построенных на основе вихревого и ионно-меточного методов контроля параметров набегающего воздушного потока.**

В работах [5 – 7] приводятся результаты исследования по разработке информационно-измерительной системы воздушных сигналов дозвукового ЛА с одним неподвижным

приемником набегающего потока и встроенным вычислителем, построенная на основе вихревого метода контроля параметров набегающего воздушного потока. В качестве приемника используются две клиновидные пирамиды, основания которых расположены под одинаковым углом встречно потоку и контролируются частоты образования и срыва вихрей с поверхностей пирамид. По измеренным частотным срывам вихрей по разработанным аналитическим моделям в вычислителе определяются и формируются выходные сигналы системы по истинной воздушной скорости, и аэрометрическому углу в плоскости расположения клиновидных пирамид. Для расширения функциональных возможностей и измерения других воздушных сигналов предложено [6] на поверхности обтекателя, установленного на внешней торцовой поверхности клиновидных пирамид, расположить отверстие для восприятия статического давления набегающего потока, соединенного пневмопроводом с датчиком абсолютного давления, выход которого подключен ко входу вычислителя. По измеренным истинной воздушной скорости и статическому давлению по предложенным аналитическим моделям на выходе вычислителя формируются выходные сигналы по приборной скорости, числу Маха, барометрической высоте и вертикальной скорости, давлению, температуре и плотности окружающей среды на текущей высоте полета [7]. Предложенные научно-технические решения позволили упростить конструкцию, уменьшить массу и стоимость информационно-измерительной системы воздушных сигналов дозвукового ЛА на основе вихревого метода контроля параметров набегающего воздушного потока за счет использования одного неподвижного приемника первичной информации о параметрах набегающего воздушного потока в виде частотных информативных сигналов, упрощающих их восприятие, преобразование и обработку во встроенном вычислителе. Однако такая вихревая информационно-измерительная система имеет узкий диапазон измерения аэродинамического угла, ограниченный значением  $\pm 25$  угл. град, что не позволяет измерить угол скольжения в диапазоне его изменения до  $\pm 180$  угл. град. Кроме того, измерение воздушных сигналов ЛА вихревая информационно-измерительная система обеспечивает только в одной азимутальной или вертикальной ей плоскости. Все это сдерживает ее разработку и применение.

Проводится разработка информационно-измерительной системы воздушных сигналов ЛА, построенной на основе ионно-меточного метода контроля параметров набегающего воздушного потока. С помощью искрового разрядника, установленного на обтекаемой поверхности неподвижного приемника, в набегающем потоке периодически формируется ионная метка с явно выраженным электрическим зарядом, которая вносится в набегающий поток и приобретает его скорость и направление. С помощью расположенных на обтекаемой поверхности неподвижного приемника системы приемных электродов, расположенных равномерно на окружности с радиусом в точке установки разрядника, по сигналам, наводимых на приемных электродах движущейся заряженной ионной меткой, регистрируется скорость и угол траектории ее движения совместно с потоком. Многоканальная измерительная схема измеряет сигналы, наводимые на приемных электродах, которые обрабатывает встроенный вычислитель и по разработанным аналитическим моделям определяет и формирует выходные сигналы по истинной воздушной скорости и аэродинамическому углу в плоскости расположения приемных электродов в диапазоне до  $\pm 180$  угл. град. Для расширения функциональных возможностей и измерения других воздушных сигналах на обтекаемой поверхности неподвижного приемника установлено отверстие для восприятия статического давления, которое пневмоканалом соединено с датчиком абсолютного давления, выход которого подключен ко входу вычислителя, определяющим и формирующим выходные сигналы ионно-меточной информационно-измерительной системы по воздушным сигналам движения ЛА всем потребителям в широком диапазоне изменения аэродинамического угла, но также только в одной плоскости. Кроме того, жесткие требования к идентичности и стабильности характеристик измерительных каналов многоканальной измерительной схемы приводят к снижению технологичности и усложнению многоканальной измерительной схемы, что ограничивает применение ионно-меточной информационно-измерительной системы воздушных сигналов на малоразмерных летательных аппаратах.

**Принципы построения и функциональная схема информационно-измерительной системы воздушных сигналов летательного аппарата на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего воздушного потока.**

Широкое применение ультразвукового метода измерения параметров потоков газа и жидкости в расходометрии и других областях [11 – 13] определили направления работ по

разработке оригинального панорамного датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости с неподвижным приемником и ультразвуковыми измерительными каналами [14] и рассматриваемой информационно-измерительной системы пространственного измерения воздушных сигналов летательного аппарата на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего воздушного потока. Принцип действия измерительных каналов при использовании ультразвукового метода контроля скорости и угла направления контролируемого потока заключается в измерении разности интервалов времени распространения ультразвуковых колебаний от излучателя до приемника или в измерении разности частот формируемых на выходе приемника электрических сигналов при распространении ультразвуковых колебаний от излучателя до приемника по направлению контролируемого потока и против потока. При этом для измерения угла направления контролируемого потока используются два измерительных канала, оси распространения ультразвуковых колебаний которых разнесены в плоскости изменения контролируемого угла направления на одинаковый угол относительно оси, параллельной продольной оси, относительно которого отсчитывается контролируемый угол [15].

На рисунке приведена функциональная схема информационно-измерительной системы воздушных сигналов летательного аппарата на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего воздушного потока. Система содержит вынесенную за обшивку ЛА плиту 1, на которой на стойках 3 расположены совмещенные пары излучателей-приемников ультразвуковых колебаний И1–П1, И2–П2 и И'1–П'1, И'2–П'2, расположенных по окружности в плоскости изменения угла скольжения  $\beta$ . При этом оси распространения их ультразвуковых колебаний, расположены под углом  $\Theta_0 = 45^\circ$  к оси, параллельной продольной оси ЛА в плоскости угла скольжения. Пары излучателей-приемников И3–П3, И4–П4 и И'3–П'3, И'4–П'4 установлены в плоскости изменения угла атаки  $\alpha$  и их оси распространения ультразвуковых колебаний расположены под углом  $\Phi_0 = 45^\circ$  у оси, параллельной оси ЛА в плоскости изменения угла атаки.

Пьезоэлектрические излучатели И1, И2, И3, И4 генерируют ультразвуковые колебания, которые распространяются по направлению вектора  $\bar{V}$  набегающего воздушного потока в плоскости изменения измеряемых аэродинамических углов, которые воспринимаются соответствующими пьезометрическими приемниками П1, П2, П3, П4. Излучатели И'1, И'2, И'3, И'4 генерируют ультразвуковые колебания, которые распространяются встречно набегающему потоку и принимаются приемниками П'1, П'2, П'3, П'4. Все излучатели через соответствующие модуляторы М1, М2, М3, М4 и М'1, М'2, М'3, М'4, работающие в триггерном режиме переключения, подключены к генератору 4 колебаний высокой частоты. При восприятии ультразвуковых колебаний от излучателей И1, И2, И3, И4 и И'1, И'2, И'3, И'4 на выходе пьезоэлектрических приемников П1, П2, П3, П4 и П'1, П'2, П'3, П'4 формируются электрические сигналы с частотами  $f_1, f_2, f_3, f_4$  и  $f'_1, f'_2, f'_3, f'_4$ , которые усиливаются соответствующими усилителями 7 и подаются на выходы

детекторов 8, на выходах которых выделяются частоты  $f_1, f_2, f_3, f_4$  и  $f'_1, f'_2, f'_3, f'_4$  формирования выходных сигналов приемников, регистрируемых ультразвуковые колебания по направлению набегающего потока и против потока. Измеренные в вычислителе 10 частоты  $f_1$  и  $f'_1, f_2$  и  $f'_2, f_3$  и  $f'_3, f_4$  и  $f'_4$  подаются на входы схем вычитания частот 9 СВ1, СВ2, СВ3, СВ4, на выходах которых формируются разности  $\Delta f_1 = f_1 - f'_1, \Delta f_2 = f_2 - f'_2, \Delta f_3 = f_3 - f'_3, \Delta f_4 = f_4 - f'_4$ . Выходы схем вычитания частот 9 подключены ко входам вычислителя 10, который по разработанным аналитическим моделям определяет и выдает цифровые выходные сигналы ультразвукового измерительного канала измерительно-вычислительной системы воздушных сигналов по истинной воздушной скорости  $N_{V_B}$ , по углу атаки  $N_\alpha$ , по углу скольжения  $N_\beta$ .

Для получения информации о высотно-скоростных параметрах движения летательного аппарата относительно окружающей воздушной среды на поверхности плиты 1 (рисунок) расположено отверстие 2 для восприятия статического давления  $P_H$  набегающего воздушного потока, которое пневмопроводом соединено со входом датчика абсолютного давления 5 (ДАД) с частотным выходом, подключенным ко входу вычислителя 10. По измеренному

статическому давлению  $P_H$  и вычисленной в ультразвуковом измерительном канале истинной воздушной скорости  $V_B$  в вычислителе 10 по приведенным ниже аналитическим моделям определяются и формируются цифровые сигналы высотно-скоростного измерительного канала измерительно-вычислительной системы воздушных сигналов по барометрической высоте  $N_H$ , вертикальной скорости  $N_{V_y}$ , приборной скорости  $N_{V_{pp}}$ , числу Maxa  $N_M$ , а при необходимости по статическому давлению  $P_H$ , температуре наружного воздуха  $N_{T_H}$ , плотности  $N_{\rho_H}$  окружающей среды на текущей барометрической высоте полета  $H$ .

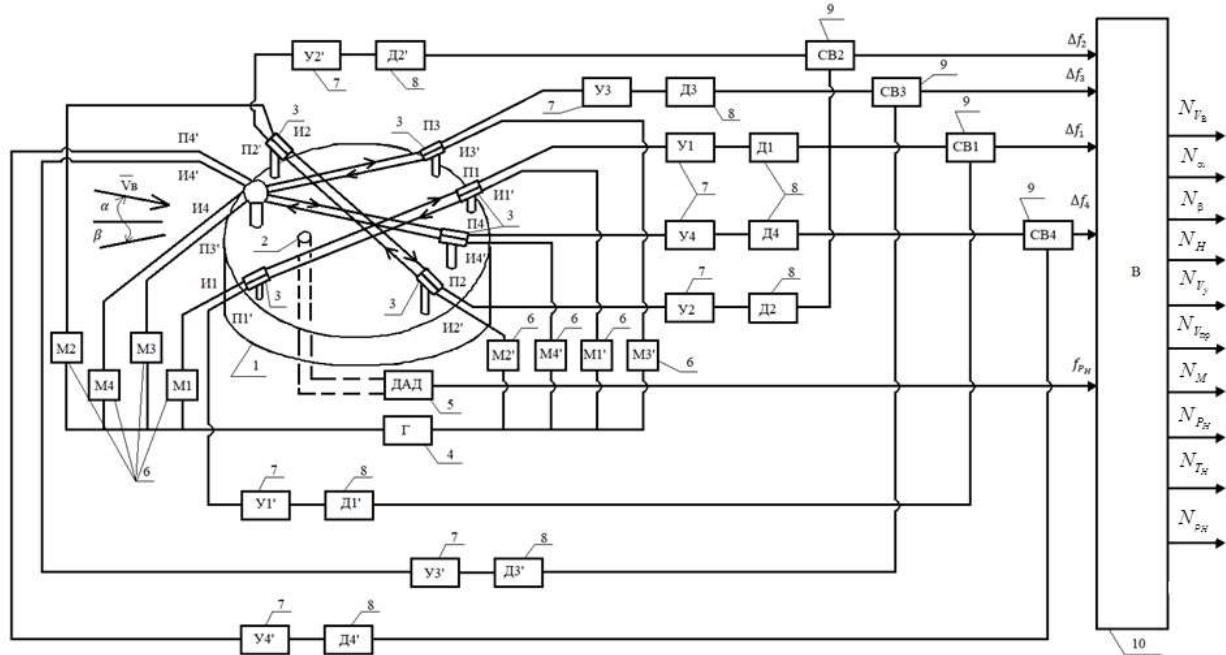


Рисунок 1 – Функциональная схема информационно-измерительной системы воздушных сигналов летательного аппарата на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего потока

#### Аналитические модели формирования и обработки информативных сигналов, определения воздушных сигналов в каналах информационно-измерительной системы.

Как отмечалось выше, работа ультразвукового измерительного канала основана на регистрации и преобразовании интервалов времени распространения ультразвуковых колебаний от пьезоэлектрических излучателей до соответствующих пьезоэлектрических приемников по направлению набегающего воздушного потока и против потока. Работа ультразвукового измерительного канала начинается с подачей сигнала начала измерения от вычислителя на модулятор  $M_1$ , который открывается и пропускает высокочастотные колебания от генератора 4 на вход излучателя  $I_1$ . На выходе пьезоэлектрического излучателя  $I_1$  в соответствии с прямым пьезоэлектрическим эффектом генерируются ультразвуковые колебания, распространяемые в сторону пьезоэлектрического приемника  $P_1$ . При достижении ультразвуковых колебаний пьезоэлектрического приемника  $P_1$  через интервал времени  $t_1$  на выходе приемника  $P_1$  в соответствии с обратным пьезоэлектрическим эффектом появляются электрические колебания, которые усиливаются усилителем  $U_1$  и демодулируются демодулятором  $D_1$ . Как только на выходе демодулятора появляется электрический сигнал он поступает на модулятор  $M_1$  и закрывает его, а открывает модулятор  $M_1'$  и высокочастотные колебания от генератора 4 подаются на пьезоэлектрический излучатель  $I_1'$ , который генерирует ультразвуковые колебания в сторону пьезоэлектрического приемника  $P_1'$  против направления контролируемого потока, который через интервал времени  $t_1'$  достигает приемника  $P_1'$  и на его выходе появляется электрический сигнал, который усиливается усилителем  $U_1'$  и демодулируется демодулятором  $D_1'$ . При появлении сигнала на выходе демодулятора  $D_1'$  он закрывает модулятор  $M_1'$  и открывает модулятор  $M_2$ . Высокочастотные колебания от генератора 4 поступают на вход пьезоэлектрического излучателя  $I_2$  и процесс измерения снова повторяется. Аналогично для излучателей  $I_3$ ,  $I_3'$  и  $I_4$ ,  $I_4'$ . Далее

аналогично новые циклы измерения параметров набегающего воздушного потока.

Для совмещенных пар излучателей-приемников И1–П1, И1'–П1' и И2–П2, И2'–П2' интервалы времени  $t_1$ ,  $t_1'$  и  $t_2$ ,  $t_2'$  распространения ультразвуковых колебаний по направлению набегающего воздушного потока и против потока будет определяться выражениями

$$\begin{aligned} t_1 &= \frac{L}{a + V \cos(\Theta_0 + \beta)}; \quad t_1' = \frac{L}{a - V \cos(\Theta_0 + \beta)}; \\ t_2 &= \frac{L}{a + V \cos(\Theta_0 - \beta)}; \quad t_2' = \frac{L}{a - V \cos(\Theta_0 - \beta)}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $L$  – расстояние между излучателями И1, И1' и приемниками П1, П1' УК;  $a$  – скорость распространения звука в воздухе;  $\beta$  – угол скольжения.

Частоты  $f_1$ ,  $f_1'$  и  $f_2$ ,  $f_2'$  сигналов, формируемых на выходах приемником П1, П1' и П2, П2', можно описать выражениями

$$\begin{aligned} f_1 &= \frac{1}{L} [a + V \cos(\Theta_0 + \beta)]; \quad f_1' = \frac{1}{L} [a - V \cos(\Theta_0 + \beta)]; \\ f_2 &= \frac{1}{L} [a + V \cos(\Theta_0 - \beta)]; \quad f_2' = \frac{1}{L} [a - V \cos(\Theta_0 - \beta)] \end{aligned} \quad (2)$$

Тогда информативные разности частот  $\Delta f_1 = f_1 - f_1'$  и  $\Delta f_2 = f_2 - f_2'$  на входе вычислителя, формируемые на выходах схем вычитания частот  $f_1$ ,  $f_2$  ультразвуковых колебаний, распространяющихся по направлению набегающего потока, и частот  $f_1'$ ,  $f_2'$ , воспринимаемых против потока, будут описываться аналитическими моделями вида

$$\Delta f_1 = \frac{2V}{L} \cos(\Theta_0 + \beta); \quad \Delta f_2 = \frac{2V}{L} \cos(\Theta_0 - \beta). \quad (3)$$

Подставляя косинусы суммы и разности в виде

$$\begin{aligned} \cos(\Theta_0 + \beta) &= \cos \Theta_0 \cos \beta + \sin \Theta_0 \sin \beta; \\ \cos(\Theta_0 - \beta) &= \cos \Theta_0 \cos \beta - \sin \Theta_0 \sin \beta, \text{ при } \Theta_0 = 45^\circ, \text{ получим} \end{aligned}$$

$$\Delta f_1 = \frac{\sqrt{2}V}{L} (\cos \beta + \sin \beta); \quad \Delta f_2 = \frac{\sqrt{2}V}{L} (\cos \beta - \sin \beta). \quad (4)$$

Тогда с учетом соотношений

$$\Delta f_1 + \Delta f_2 = \frac{2\sqrt{2}}{L} V \cos \beta; \quad \Delta f_1 - \Delta f_2 = \frac{2\sqrt{2}}{L} V \sin \beta.$$

получена аналитическая модель определения угла скольжения в виде

$$\beta = \operatorname{arctg} \frac{\Delta f_1 - \Delta f_2}{\Delta f_1 + \Delta f_2}. \quad (5)$$

С учетом соотношений

$$\Delta f_1^2 + \Delta f_2^2 = \frac{2}{L^2} V^2 \left[ (\cos \beta + \sin \beta)^2 + (\cos \beta - \sin \beta)^2 \right] = \frac{4}{L^2} V^2.$$

аналитическая модель для определения истинной воздушной скорости  $V_B = V$  будет иметь вид

$$V_B = \frac{L}{2} \sqrt{\Delta f_1^2 + \Delta f_2^2}. \quad (6)$$

Полученные аналитические модели (5) и (6) определяют процесс определения выходных сигналов ультразвукового измерительного канала в азимутальной плоскости.

С помощью совмещенных пар излучателей-приемников И3–П3, И3'–П3' и И4–П4, И4'–П4', используя выше изложенный подход, получены аналитические модели для определения истинной воздушной скорости  $V_B$  и угла атаки  $\alpha$  в вертикальной плоскости в виде

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{\Delta f_3 - \Delta f_4}{\Delta f_3 + \Delta f_4}. \quad (7)$$

$$V_B = \frac{L}{2} \sqrt{\Delta f_3^2 + \Delta f_4^2}, \quad (8)$$

где  $\Delta f_3 = f_3 - f_3'$ ;  $\Delta f_4 = f_4 - f_4'$ ;  $f_3$ ,  $f_4$  и  $f_3'$ ,  $f_4'$  – частоты выходных сигналов приемников П3, П4 и П3', П4', регистрирующих распространение ультразвуковых колебаний по направлению контролируемого потока и против потока.

Высотно-скоростные параметры движения летательного аппарата относительно окружающей воздушной среды определяются по аналитическим моделям в соответствии с ГОСТ 4.401-81 [16].

Абсолютная (барометрическая) высота  $H$  соответствует геопотенциальной высоте над уровнем моря в условиях стандартной атмосферы и определяется по формулам [17]

- при  $-2000 \text{ м} < H < 11000 \text{ м}$

$$H = \frac{T_0}{\tau} \left[ 1 - \left( \frac{P_H}{P_0} \right)^{\tau R} \right] \approx \frac{T_0 + T_H}{2} R \ln \left( \frac{P_0}{P_H} \right); \quad (9)$$

- при  $11000 \text{ м} < H \leq 15000 \text{ м}$

$$H = H_{11} + R T_{11} \ln \frac{P_{11}}{P_H}, \quad (10)$$

где  $T_0 = 288,15 \text{ К}$ ,  $T_{11} = 211,65 \text{ К}$  и  $P_0 = 101325 \text{ Па}$ ,  $P_{11} = 22632 \text{ Па}$  – температура и абсолютное давление на высоте  $H=0$  и  $H=11000 \text{ м}$ ;

$\tau=0,0065 \text{ К/м}$  – температурный градиент;

$R=29,27125 \text{ м/К}$  – газовая постоянная воздуха;

$T_H$  и  $P_H$  – абсолютная температура и давление воздуха на текущей высоте  $H$ .

Вертикальная скорость  $V_y$  определяется по производной во времени абсолютной (барометрической) высоте  $H$  как

$$V_y = \frac{dH}{dt} \approx \frac{1}{4\Delta t} [H(t_i) - H(t_i - 2\Delta t) + H(t_i - \Delta t) - H(t_i - 3\Delta t)], \quad (11)$$

где  $\Delta t$  – интервал времени, через который вычисляется абсолютная высота.

По определяемой в ультразвуковом измерительном канале истинно воздушной скорости  $V_B$  приборная скорость  $V_{\text{пр}}$  вычисляется по аналитической модели вида [18]

$$V_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{P_H T_0}{P_0 T_H}} V_B. \quad (12)$$

Используя связь с истинной воздушной скорости  $V_B$ , число Маха определяется по аналитической модели вида [18]

$$M = \frac{V_B}{\sqrt{kgRT_H}}, \quad (13)$$

где  $g = 9,80665 \text{ м/с}^2$  – ускорение силы тяжести;

$k = 1,4$  – показатель адиабаты для воздуха.

Входящая в выражения (12) и (13) абсолютная температура  $T_H$  воздуха на высоте полета  $H$  легко определяется с помощью проводникового терморезистора, установленного в пневмопроводе статического давления, включенного в мостовую измерительную схему, выход которой подключен к вычислителю. В условиях эксплуатации ЛА, близких к стандартной атмосфере, температуру наружного воздуха можно определить по аналитической модели вида [17]

$$T_H = T_0 - \tau H. \quad (14)$$

Используя работу [19], аналитическая модель для определения плотности воздуха  $\rho_H$  на высоте  $H$  имеет вид

$$\rho_H = \rho_0 \frac{P_H T_0}{P_0 T_H}, \quad (15)$$

где  $\rho_0 = 1,225 \text{ кг/м}^3 = 0,125 \text{ Нс/м}^4$  – массовая плотность воздуха на высоте  $H=0$  стандартной атмосферы по ГОСТ 4.401-81 [16].

## Заключение

Разработанные функциональная схема и аналитические модели формирования первичных информативных сигналов, их обработки и определения воздушных сигналов в ультразвуковых и высотно-скоростных измерительных каналах являются теоретической основой построения и позволяют обоснованно проводить разработку и исследование информационно-измерительной системы воздушных сигналов летательного аппарата на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего воздушного потока.

В сравнении с известными системами воздушных сигналов ЛА рассматриваемая информационно-измерительная система является чисто электронной системой с одним интегрированным неподвижным приемником набегающего воздушного потока и встроенным компьютеризированным устройством обработки и выдачи цифровой информации в системы автоматического управления и пилотирования ЛА. Это позволяет отнести рассматриваемую информационно-измерительную систему воздушных сигналов летательного аппарата к классу мехатронных измерительных систем. Отсутствие подвижных элементов, соединительных пневмопроводов и кабелей связи, частотно-временные первичные информативные сигналы, получение выходных сигналов по всем воздушным сигналам непосредственно в цифровой форме существенно снижает массу, упрощает конструкцию и снижает стоимость такой мехатронной информационно-измерительной системы, повышает надежность работы и точность измерения, упрощает ее использование в современных бортовых системах автоматического управления, пилотирования и отображения информации, в других технических системах. Все это повышает конкурентоспособность применения рассматриваемой мехатронной информационно-измерительной системы воздушных сигналов на малоразмерных, пилотируемых и беспилотных ЛА, на других классах ЛА, повышая качество их управления, безопасность полетов и эффективность решения полетных задач.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филатов Г.А. Безопасность полетов в возмущенной атмосфере / Г.А. Филатов, Г.С. Пуминова, П.В. Сильвестров. – М.: Транспорт. – 1992. – 272с.
2. Макаров Н.Н. Системы обеспечения безопасности функционирования бортового эргатического комплекса: Теория, проектирование, применение / Н.Н. Макаров; под ред. д-ра техн. наук В.М. Солдаткина. – М.: Машиностроение / Машиностроение-Полет. – 2009. – 760с.
3. Клюев Г.И. Измерители аэродинамических параметров летательных аппаратов / Г.И. Клюев, Н.Н. Макаров, В.М. Солдаткин, И.П. Ефимов / Под ред. В.А. Мишина. – Ульяновск: Изд-во УлГТУ. – 2005. – 509с.
4. Солдаткин В.М. Авиационные приборы, измерительно-вычислительные системы и комплексы: Принципы построения, алгоритмы обработки информации, характеристики и погрешности: Учебное пособие / В.М. Солдаткин, Ф.А. Ганеев, В.В. Солдаткин, А.В. Никитин; под ред. д-ра техн. наук, проф. В.М. Солдаткина. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. – 2014. – 526с.
5. Ефремова Е.С. Теоретические основы построения вихревой системы измерения высотно-скоростных параметров дозвукового летательного аппарата / Е.С. Ефремова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – С. 166-176.
6. Пат. 2556760 Российской Федерации, МПК G01P5/20. Вихревой датчик аэродинамического угла и истинной воздушной скорости / В.М. Солдаткин, Е.С. Солдаткина; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ». – № 201416035/28; заявл. 21.04.2014; опубл. 20.07.2015. Бюл. № 20. – 15с.
7. Ефремова Е.С. Построение и погрешности системы воздушных сигналов на основе вихревого метода / Е.С. Ефремова, В.М. Солдаткин // Известия вузов. Приборостроение. – 2020. – Т.63. – №8. – С. 749-755.
8. Солдаткин В.М. Методы и средства измерения аэродинамических углов летательных аппаратов / В.М. Солдаткин. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. – 2001. – 448 с.
9. Ганеев Ф.А. Ионно-меточный датчик аэродинамического угла и воздушной скорости с логометрическими информативными сигналами и интерполяционной схемой обработки / Ф.А. Ганеев, В.М. Солдаткин // Известия вузов. Авиационная техника. – 2020. – № 3. – С. 97-103.
10. Солдаткин В.М. Теоретические основы построения системы воздушных сигналов самолета с неподвижным невыступающим приемником потока / В.М. Солдаткин, В.В. Солдаткин, Д.Л. Крылов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2017. – Том 18. – №7. – С. 495-502.
11. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества / П.П. Кремлевский // Изд. 3-е., перераб. и доп. Л.: Машиностроение. – 1975. – 776 с.
12. Тихомиров А.А. Ультразвуковые анемометры и термометры для измерения пульсаций скорости и температуры воздушных потоков. Обзор / А.А. Тихомиров // Оптика атмосферы и океана. – 2008. – Т. 23. – № 7. – С. 585-600.
13. Богомолов В.Ю. Информационно-измерительная система для регионального мониторинга и прогнозирования опасных метеорологических явлений / В.Ю. Богомолов, А.Я. Богушевич, Е.П. Гордов и др. // Оптика атмосферы и океана. – 2011. – Т. 24. – №17. – С. 52-59.

14. Ефремова Е.С. Трехкомпонентный датчик вектора воздушной скорости летательного аппарата на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего воздушного потока / Е.С. Ефремова, Б.И. Мифтахов, В.С. Солдаткин // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2023. – Т. 79. – №. 1. – С. 95-100.
15. Ефремова Е.С. Методические погрешности электронного датчика параметров вектора воздушной скорости летательного аппарата / Е.С. Ефремова, Б.И. Мифтахов, В.В. Солдаткин, В.М. Солдаткин // Известия вузов. Приборостроение. – 2023. – Т. 66. – № 6. – С. 457-463.
16. ГОСТ 4.401-81. Атмосфера стандартная. Параметры. – М.: Изд-во Стандартов. – 1981. – 179с.
17. Боднер В.А. Приборы первичной информации / В.А. Боднер. – М.: Машиностроение. – 1981. – 344 с.
18. Браславский Д.А. Приборы и датчики летательных аппаратов / Д.А. Браславский. – М: Машиностроение. – 1970. – 392 с.
19. Залманзон Л.А. Проточные элементы пневматических приборов контроля и управления / Л.А. Залманзон. – М.: Изд-во АН СССР. – 1961. – 249 с.

**Солдаткин Владимир Михайлович**  
ФГБОУ ВО «Казанский национальный  
исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань,  
Профессор кафедры электронного приборостроения  
и менеджмента качества  
420111, г.Казань, ул. К.Маркса, д. 10  
тел. 8(843)231-03-60  
E-mail: w-soldatkin@mail.ru

**Солдаткин Вячеслав Владимирович**  
ФГБОУ ВО «Казанский национальный  
исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань,  
Профессор кафедры электронного приборостроения  
и менеджмента качества  
420111, г.Казань, ул. К.Маркса, д. 10  
тел. 8(843)231-03-60  
E-mail: w-soldatkin@mail.ru

**Ефремова Елена Сергеевна**  
ФГБОУ ВО «Казанский национальный  
исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань,  
Доцент кафедры электронного приборостроения и  
менеджмента качества  
420111, г.Казань, ул. К.Маркса, д. 10  
тел. 8(843)231-03-60  
E-mail: soldatkina1991@bk.ru

**Солдаткин Владимир Сергеевич**  
ФГБОУ ВО «Казанский национальный  
исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань,  
Студент кафедры электронного приборостроения и  
менеджмента качества  
420111, г.Казань, ул. К.Маркса, д. 10  
тел. 8(843)231-03-60  
E-mail: w-soldatkin@mail.ru

---

V.M. SOLDATKIN, V.V. SOLDATKIN, E.S. EFREMOVA, V.S. SOLDATKIN

## INFORMATION AND MEASURING SYSTEM OF AIR SIGNALS OF AN AIRCRAFT BASED ON ULTRASONIC METHOD FOR MONITORING PARAMETERS OF INCIDENT AIR FLOW

**Abstract.** The features of the construction and limitations on the use of air signal information-measuring systems widely used in aviation, built on the basis of aerometric, aerodynamic and weathervane methods for monitoring the parameters of the incoming air flow using autonomous primary information sensors distributed throughout the fuselage and a spaced computer that generates the output signals of the system, are considered. The developed air signal systems, built on the basis of vortex and ion-tag methods for monitoring the parameters of the oncoming flow, also completely remove restrictions on use on ultra-light and small-sized aircraft.

The experience of effective use of the ultrasonic method for monitoring gas flow parameters in flow metering, metrology and other areas determines the prospects of the information-measuring system of aircraft air signals based on the ultrasonic method for monitoring the parameters of the incoming air flow with one integrated fixed receiver of primary information in the form of time-frequency informative signals, convenient for perception, conversion and processing in the built-in computer.

The principles of construction are considered, a functional diagram is given, and analytical models of information processing and determination of air signals in ultrasonic and altitude-speed measuring channels of the system under consideration are developed. The advantages are given that ensure the competitiveness of the use of the considered information-measuring system of air signals on ultra-light and small-sized aircraft for various purposes.

**Keywords:** aircraft, air signal system, information-measuring system, control of incoming air flow, ultrasonic method, principles of construction, functional diagram, analytical models of signals, processing, determination of output signals, competitive advantages of the system.

## BIBLIOGRAPHY

1. Filatov G.A. Bezopastnost poletov v vozmychennou atmosphere / G.A. Filatov, G.S. Pyminova, P.V. Silvestrov. – М.: Transport. – 1992. – 272s.
2. Makarov H.H. Sistemy obespectenya bezopastnosti funktsionirovanya bortovogo ergaticheskogo kompleksa: Teoriya, proektirovanie, primenie / H.H. Makarov; pod red. d-ra tech. nauk V.M. Soldatkina. – М.: Mashinostroyeniye-Polet. – 2009. – 760s.
3. Kljuev. G.I. Izmeriteli dinamicheskikh parametrov letatel'nyh apparatov / G.I. Kljuev, N.N. Makarov, V.M.

- Soldatkin, I.P. Efimov: Uchebnoe posobie. Ul'janovsk: Izd-vo Ul'janovsk. gos. tehn. un-t. – 2005. – 590 s.
4. Soldatkin V.M. Aviationnye pribory, izmeritelbo-vicheslitelnye sistemy I kompleksy: Printipsy postroenia, algoritmy obrabotki informatsie, xarakteristiki i pogrechostki: Uchebnoe posobie / V.M. Soldatkin. – Kazan: Izd-vo Kazan. gos. un-ta. – 2014. – 526s.
5. Efremova E.S. Toreticheskiye osnovy postroenia vixrevoy sistemy izmerenia vysotno-skorostnykh parametrov dozvykovogo letatelnogo apparata / E.S. Efremova // Izvestia Tylskogo gosudarstvennogo universiteta. Technicheskie nauki. – 2017. – S. 166-176.
6. Patent 2556760 RF, MPK G01P5/20. Vihrevoj datchik ajerodinamicheskogo ugla i istinnoj vozdushnoj skorosti / V.M. Soldatkin, E.S. Soldatkina; zayavatel I patentoobladatel FGBOU VO «Kazanskia nachtionalniy issledovatelskiy tachnicheskiy universitet im. A.N. Tupoleva-KAI». – №201416035/28; zayav. 21.04.2014; opubl. 20.07.2015. Bjul. № 20. – 15s.
7. Efremova E.S. Postroenie i pogrechnosti sistemy vozduchnix signalov na osnove vihrevogo metoda / E.S. Efremova, V.M. Soldatkin // Izvestia vyzov. Priborostroenie. – 2020. – T.63. – № 8. – S. 749-755.
8. Soldatkin V.M. Metody i sredstva izmerenija ajerodinamicheskikh uglov letateln'nyh apparatov / V.M. Soldatkin. – Kazan': Izd-vo Kazan. gos. tehn. un-ta. – 2001. – 448 s.
9. Ganeev F.A. Ionno-metochniy datchik ajerodinamicheskogo ugla i vozdushnoj skorosti s logometricheskimi informativnymi signalami i interpolaychtionnoy sxemoy obrabotki / F.A. Ganeev, V.M. Soldatkin // Izvestia vyzov. Avictionnay technika. – 2020. – № 3. – S. 97-103.
10. Soldatkin V.M. Toreticheskiye osnovy postroenia sistemy vozduchnix signalov samoleta s nepodviznim nevistupauzchim priemnikom potoka / V.M. Soldatkin, V.V. Soldatkin, D.L. Krilov // Mechatronika, avtimatizacia, upravlenie. – 2017. – T.18. – № 7. – S. 495-502.
11. Kremlevskiy P.P. Rasxodomery i schtetchiki kolichestva / P.P. Kremlevskiy // Izd. 3-e., pererab. i dop. L: Mashinostroyeniye. – 1975. – 776.
12. Tixomirov A.A. Ultrazvykovie anemometry dlya izmerenia pelsactiy skorosti i temperetury vozduchnix potokov. Obzor / A.A. Tixomirov // Optika atmosfery i okeana. – 2008. – T.23. – № 7. – S. 585-600.
13. Bogomolov V.Ju. Informachtionno-izmeritelnye sistema dlya regionalnogo monitoring i prognozirovania opastnix meteorologicheskix javleniy / V.Ju. Bogomolov, A.Ja. Bogychevich, E.P. Gordov i dr. // Optika atmosfery i okeana. – 2011. – T. 24. – №17. – S. 52-59.
14. Efremova E.S. Trexkomponentniy datchik vektora vozdushnoj skorosti letatelnogo apparata na osnove ultrazvukovogo metoda kontrolay parametrov nabegauchego vozdushnogo notoka / E.S. Efremova, B.I. Miftchachov, V.S. Soldatkin // Vestnik KGTU im. A.H. Tupoleva. – 2023. – T. 79. - № 1. – S. 95-100.
15. Efremova E.S. Metodiceskie pogrechnosti elektronnogo datchika parametrov vektora vozdushnoj skorosti letatelnogo apparata / E.S. Efremova, B.I. Miftchachov, V.V. Soldatkin, V.M. Soldatkin // Izvestiay vyzov. Priborostroenie. – 2023. – T. 66. – № 6. – S. 457-463.
16. GOST 4401-81. Atmosfera standartnaya. Parametry. – M.: Izd-vo Standartov. – 1981. – 179s
17. Bodner V.A. Pribory pervechnoy informactie / V.A. Bodner. – M: Mashinostroyeniye. – 1981. – 344s.
18. Braslavskiy D.A. Pribory i datchiki letatelnogo apparata / D.A. Braslavskiy. – M: Mashinostroyeniye. – 1970. – 392s.
19. Zalmanzol L.A. Protochnie element pnevmaticheskix priporov kontrolay i upravleniay / L.A. Zalmanzol. – M: Izd-vo AN SSSP. – 1961. – 249s.

**Soldatkin Vladimir Mikhailovich**

FSBEI HE « Kazan National Research Technical University named after A.N.Tupolev-KAI», Kazan, Professor of Department of Electronic Instrument Making and Quality Management  
420111, Kazan, K.Marksa str,10  
Ph. 8(843)231-03-60  
E-mail: w-soldatkin@mail.ru

**Soldatkin Vyacheslav Vladimirovich**

FSBEI HE « Kazan National Research Technical University named after A.N.Tupolev-KAI», Kazan, Professor of Department of Electronic Instrument Making and Quality Management  
420111, Kazan, K.Marksa str,10  
Ph. 8(843)231-03-60  
E-mail: w-soldatkin@mail.ru

**Efremova Elena Sergeevna**

FSBEI HE « Kazan National Research Technical University named after A.N.Tupolev-KAI», Kazan, Associate Professor of Department of Electronic Instrument Making and Quality Management  
420111, Kazan, K.Marksa str,10  
Ph. 8(843)231-03-60  
E-mail: soldatkina1991@bk.ru

**Soldatkin Vladimir Sergeevich**

FSBEI HE « Kazan National Research Technical University named after A.N.Tupolev-KAI», Kazan, Student of Department of Electronic Instrument Making and Quality Management  
420111, Kazan, K.Marksa str,10  
Ph. 8(843)231-03-60  
E-mail: w-soldatkin@mail.ru

В.В. СИДОРИН, Н.Б. ХАЛИЛЮЛИНА

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ПРОЕКТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ТАБЛИЦЫ ИСТИННОСТИ (TRUTH TABLE METHOD, TTM)

**Аннотация.** В основе представленного в настоящей статье подхода к управлению и оптимизации проектной деятельности – прогнозирование её результативности на основе априорной оценки вероятности достижения целей на каждом её этапе. Оценка вероятности выполняется методом на основе таблицы истинности (Truth Table Method, TTM) [1]. Метод включает разработку функциональной структуры проекта, анализ возможных вариантов и выбор основного и альтернативных для каждого из этапов проекта, расчёт вероятности достижения целей и результативности каждого из этапов проекта. Метод даёт возможность выявлять сильные и слабые стороны планируемых к постановке работ по процессу, определять возможности повышения их результативности. Применение метода позволит исключить на этапе планирования неперспективные варианты выполнения работ, оптимизировать затраты ресурсов и повысить тем самым эффективность выполнения проекта.

**Ключевые слова:** проект, научно-исследовательская работа, опытно-конструкторская работа, результативность, эффективность, условная вероятность, жизненный цикл, таблица истинности.

### Введение

Отличительные признаки проектной деятельности – уникальность цели и процесса её достижения с ограниченными сроками и ресурсами - источник и причина высокой степени риска невыполнения требований. Эта проблема в отношении различных видов проектной деятельности – проектов, портфеля проектов, программ, научно-исследовательских, опытно-конструкторских работ (НИР, ОКР), аванпроектов (АП) решается организационными методами, наиболее эффективные из которых formalизованы в виде международных и национальных российских стандартов. Так, обобщённый и сконцентрированный в двух концепциях – «менеджмент качества в проектах» и «системы менеджмента качества в проектах» опыт проектной деятельности представлен в виде руководящих указаний по применению менеджмента качества в проектах [2]. Это свод рекомендаций, адресованный различным организациям, выполняющим проекты различного объёма, направленности и сложности, области деятельности. Они применимы и для проектов одиночных, самостоятельных, так и для программ или портфелей проектов. На их основе организаций-исполнитель разрабатывает процессы и управляющие процедуры, регламентирующие выполнение действий по проекту с учётом его особенностей и своих возможностей.

С более конкретной целью, а именно – с целью обеспечения эффективного достижения целей отдельного проекта, портфеля проектов или программ разрабатываются управляющие процедуры с целью снижения степени неопределённости в достижении установленной цели, дополнительно руководствуясь соответствующими стандартами, целенаправленно разработанными для проектов, портфеля проектов и программ - их организационными информационными моделями [3-5]. Стандарты, регламентирующие особенности управления проектами, портфелем проектов и программой, выполняют также и функции критериев и методической основы оценки их соответствия моделям управления.

Системный подход к проектной деятельности как к одной из стадий жизненного цикла продукции с видением перспектив практической реализации её результатов в производстве и применении документирован комплексами стандартов Системы разработки и постановки продукции на производство (СРПП) [6-8], Системы разработки и постановки продукции на производство, Военная техника (СРПП ВТ), Комплексной системы общих технических требований (КСОТТ), Комплексной системой контроля качества (КСКК) [9-12]. Стандарты систем реализуют организационно-методический подход к обеспечению качества на стадиях жизненного цикла продукции, включая постановку и выполнение НИР, ОКР, АП. С целью повышения уверенности в достижении целей работ стандартами устанавливаются требования и рекомендации по установлению достижимых и измеримых целей, ответственности

руководителей и исполнителей работ за их достижение в требуемые сроки, планирование и своевременное обеспечение необходимыми ресурсами, организацию взаимодействия исполнителей, мониторинг и контроль достижения целей, выявление и своевременное выполнение управленческих решений.

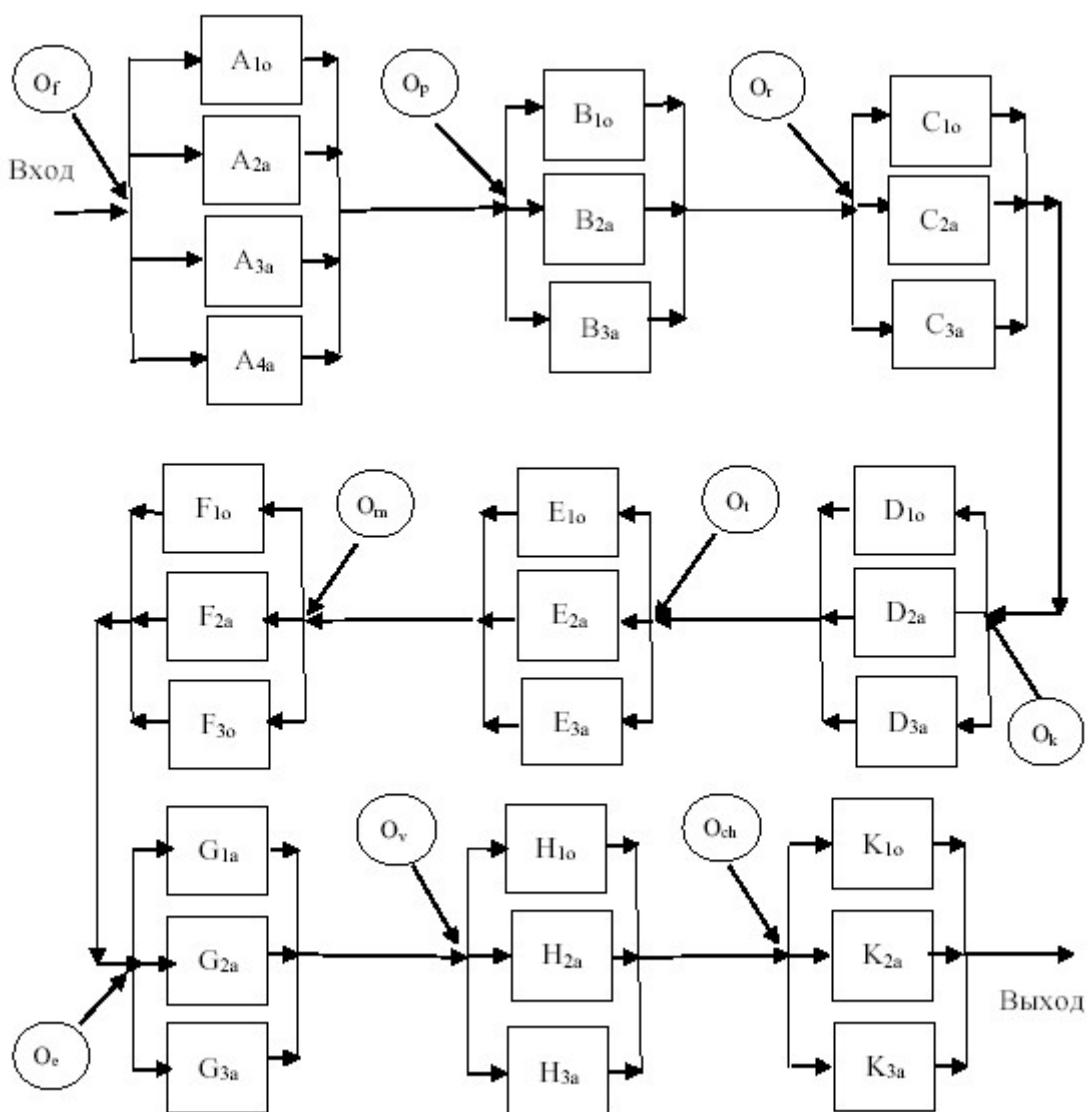
Совершенствование организационно-методического подхода, расширение и повышение уровня требований к проектной деятельности в стандартах, включая стандарты на системы менеджмента качества (СМК), не исключает такие факторы неопределенности и риски, связанные с неверной постановкой цели, непредвиденными обстоятельствами, использованием неполной, недостоверной информации, компетентностью и ошибками исполнителей. Эту проблема в каждом конкретном случае решается прогнозированием результатов проекта, НИР, ОКР, АП. Уверенность в достижении цели требует прогнозирования и выбора оптимальной траектории её достижения и управления запланированными действиями. Достоверность результатов прогнозирования в свою очередь зависит от множества факторов: объёма информации, особенностей каждого из проектов, предшествующего опыта, выявленных закономерностей и ряда других, что указывает на ограниченность возможностей и области предпочтительного применения каждого из известных методов и актуальность разработки новых, совершенствования или адаптации для решения новых задач методов известных. Для этого необходим анализ объекта прогнозирования – проекта, НИР, ОКР, АП с последующей разработкой подхода и метода получения с максимально возможной вероятностью о их результатах. В последующих разделах на основе обобщённой функциональной схемы представлен анализ проекта, НИР, ОКР, АП как последовательность связанных общей целью этапов и описан подход на основе метода таблицы истинности прогнозирования вероятности достижения цели каждого из этапов и проекта в целом. Возможности метода ТТМ позволяют применить его не только для анализа надежности технических систем, но и в отношении систем управления процессами, различными видами деятельности, системами менеджмента.

### **Функциональная схема управления постановкой и выполнением проекта, научно-исследовательских, опытно-конструкторских работ, аванпроектов**

Постановка и выполнение, НИР, ОКР, АП с целью создания новых образцов вооружения и военной техники (ВВТ) регламентируется стандартами СРПП, СРПП ВТ [6-8], КСОТТ, КСКК и другими общетехническими комплексами документов по стандартизации [9-12]. Оптимизированный стандартами состав, цели и содержание выполняемых этапов НИР и ОКР направлен на обеспечение эффективности выполнения НИР или ОКР организационно-техническими методами (рисунок 1). Стандарты на СМК дополняют их менеджментом рисков, менеджментом конфигурации, управлением изменениями как на каждом из этапов, так и в отношении работ в целом. Прогнозирование результатов всей совокупности этапов НИР, ОКР, АП и каждого из них позволит выбрать оптимальный вариант выполнения из нескольких возможных, что значительно повысит эффективность каждого из этапов и работы в целом.

Анализ содержания этапов НИР и ОКР позволяет определить для каждого из них адекватные подходы и методы прогнозирования, исходя из требований и возможностей их выполнения.

Первый этап - анализ требований заказчика, оценка возможностей и ресурсов организации-исполнителя для принятия обязательств по их выполнению. Непосредственному выполнению работ на первом этапе НИР и ОКР предшествует определение требуемого объёма и источников финансирования. Анализ современного состояния и достигнутого научно-технического и конструктивно-технологического уровня решения аналогичных проблем в мире, в стране, отрасли, а также подобных проблем в смежных отраслях - основа установления совместно с заказчиком целей и сроков выполнения работы. Достоверность и полнота информации в оценке состояния достигнутого уровня работ в отрасли, стране, мире по патентной, научно-технической литературе и другим источникам определяет возможность формирования состава исполнителей и выбор направления исследований. Прогнозирование результатов работы на этом этапе позволяет обоснованно устанавливать цели и методы её достижения, оценивать вероятность её достижения имеющимися для этого возможностями.



**Рисунок 1 – Последовательность этапов выполнения НИР/ОКР и возможные варианты решений их выполнения (основной – индекс «о» и альтернативные – индекс «а», «о» – менеджмент рисков и выбор варианта)**

С этой целью выполняется общее ознакомление с проблемами в области планируемых исследований, анализ информации по различным источникам – литературной, патентной, отчётной документации, нормативным документам, документам по стандартизации. На основе анализа информации формулируются выводы по оценке состояния проблемы, устанавливаются цели и задачи исследования и разработки с учётом требований заказчика. Даётся предварительная оценка требуемого объёма финансирования и рассматривается возможность финансирования работ по проекту из различных источников.

Результат этапа – информация, структурированная по видам, источникам, степени актуальности и другим критериям, классификация по направлениям исследований, другим классификационным признакам, оценка достигнутого научно-технического или/и технического уровня в области планируемых исследований и разработок, определение возможности и целесообразности использования известного опыта для выполнения планируемых работ. Идентифицируются, оцениваются и ранжируются риски финансирования и вероятность финансирования из различных источников.

На рисунке 1 этап A - финансирование НИР и ОКР включает такие возможные его варианты и источники:

- $A_{o1}$  – бюджетное финансирование государственного оборонного заказа (ГОЗ);
- $A_{a2}$  – внебюджетное финансирование;

$A_{a3}$  – государственно-частное партнёрство;

$A_{a4}$  – собственные финансовые средства организации;

На основании анализа вырабатываются предложения по выбору направлений исследований, оценивается возможность выполнения требований заказчиков работ, даётся предварительная оценка результатов.

На следующем этапе выполняется анализ потребности организации-исполнителя в ресурсах всех видов для выполнения работ по проекту (НИР, ОКР, АП, и др.). Определяются возможные источники ресурсов, идентифицируются и оцениваются риски, связанные с поставкой и использованием ресурсов для выполнения работ по проекту. С учётом рисков оценивается возможность и целесообразность постановки и выполнения работ по проекту при получении ресурсов из различных источников.

Этап  $B$  включает анализ достаточности собственных ресурсов организации и обоснование необходимости привлечения ресурсов извне с учётом особенностей и рисков поставки ресурсов из различных источников. Основные варианты включают:

$B_{a1}$  – использование исключительно собственных ресурсов организации-исполнителя;

$B_{a2}$  – привлечение ресурсов из различных внешних источников, включая заказчиков работ по проекту (ресурсы, получаемые извне),

$B_{a3}$  – комбинированное обеспечение выполнения проекта, НИР и ОКР ресурсами (как собственными, так и получаемыми извне).

Следующий этап –  $C$  – обоснование, выбор и реализация подхода к достижению цели работы, включая конструктивно-технические и технологические решения оптимальные для выполнения требований контракта (договора) на выполнение НИР и ОКР, АП с учётом объёма всех видов ресурсов, определённых на предшествующем этапе. Одним из основных критериев выбора оптимального варианта подхода к достижению цели работы и решению требуемых для этого задач является менеджмент рисков, связанных с их особенностями. Основные из возможных вариантов подхода к достижению цели проекта:

$C_{a1}$  – ориентация на создание инновационной, конкурентоспособной продукции, превосходящей и опережающей лучший мировой уровень;

$C_{a2}$  – создание продукции – функционального аналога существующих конструктивно-технических и технологических решений с преимущественным применением комплектующих изделий (КИ), электронно-компонентной базы (ЭКБ), материалов, сырья, оборудования российского производства;

$C_{a3}$  – воспроизведение существующих аналогов и/или прототипов с применением КИ, электронно-компонентной базы (ЭКБ), материалов, сырья, оборудования как российского, так и иностранного производства.

Этап  $D$  – формирование группы исполнителей включает возможность обращения к таким основным вариантам подбора персонала для выполнения работ по проекту как:

$D_{a1}$  – привлечение к выполнению работ по проекту, НИР, ОКР, АП только сотрудников организации-исполнителя;

$D_{a2}$  – включение в состав исполнителей на условиях трудового договора на время выполнения работы сотрудников сторонних организаций;

$D_{a3}$  – привлечением специалистов сторонних организаций для выполнения отдельных узкоспециальных работ.

Цель теоретической части работ по проекту – этапа  $E$  – продолжение и развитие результатов первого этапа, на котором в результате анализа информации и оценки достигнутого научно-технического уровня были сформулированы цели работы и ожидаемые её результаты. Этап включает формулирование гипотез, разработку концепции решаемой проблемы, уточнение целей работы, постановку и решение требуемых для достижения целей задач. В зависимости от требований заказчика и возможностей исполнителя возможны следующие варианты подхода к решению проблем на теоретическом уровне, различные по масштабу и значимости:  $E_{a1}$  – фундаментальные и прикладные исследования, выполняемые организацией, и разработка на их основе инновационных конструктивно-технических (организационно-технических, технологических) решений поставленной задачи, с целью получения результата,

превосходящего лучший мировой уровень,  $E_{a2}$  – прикладные исследования, выполняемые организацией с использованием собственного научно-технического задела и опыта, известных подходов и решений, разработка на их основе конструктивно-технических (организационно-технических, технологических) решений поставленной задачи на уровне лучших аналогов,  $E_{a3}$  – прикладные исследования и разработки, адаптирующие ранее полученные результаты для достижения цели проекта.

Моделирование процессов и их результатов при выполнении НИР и ОКР – этап  $F$  включает варианты:  $F_{o1}$  – разработка релевантных математических моделей и их применение для прогнозирования результатов, управления выполнением работ, оценки результатов, верификации, валидации,  $F_{a2}$  – физическое моделирование для экспериментального исследования результата процесса, разработки, объекта изучения, получения новых знаний об объекте исследования и разработки или/и для оценки соответствия результатов теоретических и экспериментальных исследований,  $F_{a3}$  – имитационное моделирование, воспроизводящее исследуемые свойства изучаемого объекта, описывающее их в различных условиях, имитируемыми реальными физическими воздействиями, или информационными технологиями..

Проверка экспериментами результатов теоретической части работ и моделирования – этап  $G_{o1}$  включает изготовление экспериментальных образцов и проведение измерений и испытаний на них, или непосредственно на изделиях из опытной партии разрабатываемой продукции. Альтернативные варианты:  $G_{a2}$  – разработка, испытания и исследование свойств изучаемых объектов на макетах разрабатываемых изделий или/и их составных частей,  $G_{a3}$  – исследование свойств разрабатываемых изделий или/и их составных частей по испытаниями на моделях, воспроизводящих их свойства.

Цель этапа  $H$  – верификация и валидация – установление соответствия процессов и результатов НИР и ОКР установленным требованиям и выполнения функций в заданных условиях применения и/или эксплуатации. Способы верификации и валидации включают варианты:  $H_{o1}$  – измерения параметров и оценка соответствия результатов процессов, разработанных образцов продукции установленным требованиям, натурные испытания продукции,  $H_{o2}$  – измерения параметров и оценка соответствия установленным требованиям макетов, моделей или/и экспериментальных образцов продукции,  $H_{a3}$  – оценка процессов и результатов НИР и ОКР математическим моделированием, имитационными или/и ускоренными испытаниями.

Возможность устраниТЬ выявленные несоответствия, улучшить процессы и их результаты реализуется деятельностью на этапе  $K$  – управлением изменениями. Улучшения – инструмент своевременной коррекции для достижения поставленных целей как проекта в целом, так и каждого из его этапов, включая основной вариант  $K_{o1}$  – изменение сроков выполнения отдельных этапов или/ и работы в целом без отступления от требований к качеству разработки и объема и вида финансирования. Альтернативные варианты манипулируют объемом финансирования и требованиями к качеству разработки:  $K_{a2}$  – изменение (увеличение) объема финансирования с возможностью изменения и источников финансирования без отступления от требований к качеству разработки и установленных сроков выполнения работ и  $K_{a3}$  – отступление от требований к показателям качества разработки, без отступления от сроков выполнения работ и объема финансирования.

Каждому этапу предшествует менеджмент рисков, являющийся управляющим элементом и определяющим возможность выполнения работ по этапу. От его результативности зависит и вероятность достижения цели на каждом этапе и проекта в целом. Под результативностью менеджмента рисков понимается отношение нейтрализованных рисков к общему числу идентифицированных рисков для каждого из этапов и для проекта в целом.

На рисунке 1 в виде элементов управления на входе каждого из этапов представлены:  $O_f$  – управление рисками финансирования,  $O_p$  – управление рисками обеспечения ресурсами,  $O_r$  – риски выбора направления исследований и разработки,  $O_k$  – управление рисками формирования группы исполнителей,  $O_t$  – риски, связанные с выполнением теоретической части работ по проекту,  $O_m$  – риски, связанные с моделированием процессов и разработкой

макетов, по проекту,  $O_e$  – риски, связанные с выполнением экспериментов в проекте,  $O_v$  – риски верификации и валидации при выполнении работ по проекту и его результатов,  $O_{ch}$  – риски, связанные с управлением изменениями в проекте.

Выбор оптимального варианта действий из ряда возможных на каждом этапе требует эффективного метода их анализа и оценки с учётом рисков и влияющих факторов для исключения непроизводительных затрат ресурсов на проработку решений поставленных задач, не имеющих перспектив реализации. Наиболее полно этим требованиям соответствует метод, в основе которого аналитический подход к оценке вероятности достижения поставленной цели на каждом этапе и проекта в целом, на основании которой могут приниматься решения по выбору того или иного варианта выполнения установленных требований.

## 2 Метод выбора оптимального варианта постановки и выполнения проектов – научно-исследовательских, опытно-конструкторских работ, аванпроектов

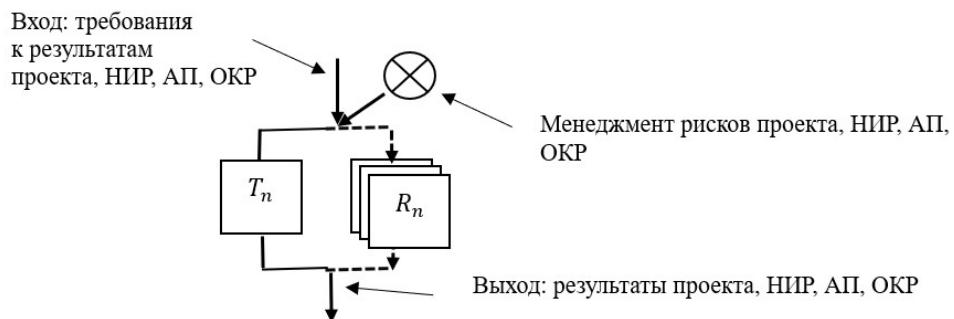
Эффективность проектной деятельности – НИР, АП, ОКР определяется соотношением достигнутого запланированного результата и затрат всех видов ресурсов на их достижение – материальных, финансовых, временных, людских, информационных и др. Достижение оптимального соотношения «соответствующий требованиям результат» - «затраченные ресурсы» требует безошибочного выбора лучшего из возможных вариантов решения при постановке и выполнении НИР, АП, ОКР. Необходимость такого выбора относится как к работе в целом, так и к каждому из её этапов.

Критерием принятия решения и для работы в целом, и в отношении каждого из её этапов может быть максимальное значение вероятности достижения поставленной цели для каждого из возможных вариантов. В основе оценки вероятности – как ранее полученный опыт подобной работы, аналоги, прототипы создаваемой продукции, конструктивно-технических организационно-методических решений – априорная информация, так и информация апостериорная, получаемая в процессе выполнения работ и дающая возможность для уточнения оценки. Оценка вероятности получения запланированного результата в различных вариантах достижения поставленных целей на каждом из этапов проекта, НИР, АП, ОКР для требуют большого объёма исходных данных. А разнообразие задач и методов их решения для постоянного уточнения оценок требует дополнительной информации, получаемой в процессе выполнения работ. Поэтому наиболее целесообразным является итерационный подход к оценке вероятности получения запланированного результата для каждого из вариантов их достижения. Заключается он в последовательном анализе системы и её элементов по её модели, представленной на рисунке 2. В основе метода оценки вероятности достижения поставленной цели каждым из возможных вариантов и выбора из них наиболее оптимального – метод таблицы истинности (ТТМ-метод). Его содержание и применение рассмотрено на примере оценки вероятности достижения поставленной цели на этапах проекта.

Последовательный итерационный процесс оценки вероятности достижения поставленной цели состоит в том, что каждый из этапов проекта (рисунок 1) рассматривается как деятельность, которая может быть выполнена двумя способами – основным  $T_n$  и альтернативными ( $R_{an}$ ). На основе полученной оценки вероятности принимается решение о предпочтительности выбора варианта выполнения действий по этапу. Вместе с другой необходимой информацией оценка вероятности достижения цели на предшествующем этапе вместе с другой необходимой информацией используется для оценки вероятности получения запланированных результатов на следующем этапе.

В том случае, когда по результатам оценки предпочтительным оказывается альтернативный путь к достижению поставленной цели, и при этом в нем содержится несколько вариантов решения, для выбора наиболее предпочтительного из них применяется тот же подход. Из всей совокупности альтернативных вариантов выбирается один, основной по отношению к остальным. А затем процедура оценки вероятности достижения цели этапа повторяется до получения оценки вероятности по каждому из возможных вариантов. Полученная таким образом оценка всех возможных вариантов выполнения действий по этапу

принимается во внимание для принятия решения по тому ли иному критерию, по максимальному значению вероятности достижения цели, в частности.



**Рисунок 2 – Основной  $T_n$  и альтернативные  $R_n$  варианты выполнения действий на этапах проекта, НИР, ОКР, АП**

Последовательно выполненная оценка всех этапов проекта даёт итоговую оценку вероятности достижения цели работы. При условии, что исключается одновременная реализация возможных вариантов выполнения работ по этапам проекта, вероятность  $P_r$  того, что реализуется тот или иной из них, может быть определена по формуле полной вероятности:

$$P_r = \sum_{n=1}^N P(R_{an}|T_n) P(T_n), \quad (1)$$

где  $P(R_{an}|T_n)$  - вероятность того, что поставленные цели проекта будут достигнуты в результате последовательного выполнения  $T_n$  этапов и достижения в них поставленных целей,

$P(T_n)$  - вероятность того, что проект, НИР, АП, ОКР выполняется как последовательность этапов  $T_n$ .

Один из первых этапов проекта – определение источников финансирования. Определяя основным видом финансирования проекта бюджетное финансирование  $A_o$ , и рассматривая как альтернативные  $A_a$  все другие возможные источники, оценить вероятность достижения цели этого этапа проекта позволит анализ возможных вариантов развития событий по модели, представленной на рисунке 1. Цель этого этапа, которая и является критерием в оценке вероятности её достижения - получение финансовых ресурсов в установленные сроки в объёме достаточном для выполнения проекта.

На этапе решения вопроса с финансированием проекта, НИР, АП, ОКР последовательно рассматривается и оценивается вероятность получения необходимых финансовых средств по основному  $A_o$  и альтернативному  $A_a$  варианту с учётом и управлением связанными с ними рисками  $O_f$ .

Основной вариант в анализе выбирается на основе исходной как априорной, так и апостериорной информации, т.е. имеющегося опыта выполнения в организации подобных работ, анализа среды и ресурсов организации для оценки готовности выполнить работы по проекту, анализа деятельности организаций, ведущих аналогичные работы и оценки организацией собственной конкурентоспособности и др.

Оценка вероятности достижения установленной цели, что соответствует оценке прогнозируемой результативности финансирования по основному и альтернативному пути и управлению связанными с этим рисками может дать ответ как в пользу основного, так и альтернативного варианта действий. В общем случае альтернативный путь может содержать несколько различных вариантов решений. Они затем подобным же образом последовательно, могут быть попарно рассмотрены и оценены по той же модели. В ней вариант, имеющий более высокую оценку вероятности достижения цели, уже будет рассматриваться как основной по отношению к остальным, ему альтернативным. Далее анализ может продолжаться по той же схеме до выявления варианта решения с максимальной вероятностью (прогнозируемой результативностью) достижения поставленной цели.

Для представленной модели прогнозирования результатов финансирования проекта возможны различные варианты:

$A_1$  - существует возможность финансирования как по основному (бюджетному, в частности) так и по альтернативному варианту, управление финансовыми ресурсами осуществляется, управление рисками финансирования выполняется;

$A_2$  - возможность финансирования по основному варианту отсутствует, существует возможность финансирования по альтернативному варианту, управление финансовыми ресурсами и финансовыми рисками осуществляется;

$A_3$  - возможность финансирования по основному варианту существует, отсутствует возможность финансирования по альтернативному варианту, управление финансовыми ресурсами и рисками осуществляется;

$A_4$  - бюджетный и альтернативные варианты финансирования недоступны, процесс управления финансированием проекта, НИР, АП, ОКР в управляемом состоянии, риски финансирования оцениваются;

$A_5$  - возможны как бюджетный, так и альтернативные варианты финансирования, управление финансовыми ресурсами и рисками финансирования не осуществляется;

$A_6$  - бюджетное финансирование недоступно, существует возможность только альтернативных вариантов финансирования, условия для финансирования планируемого проекта, НИР, АП, ОКР не выполняются, риски финансирования не оцениваются;

$A_7$  - существует возможность только бюджетного финансирования, альтернативные варианты финансирования недоступны, условия для финансирования планируемого проекта, НИР, АП, ОКР не выполняются, риски финансирования не оцениваются;

$A_8$  - как бюджетный, так и альтернативные варианты финансирования недоступны, условия для финансирования планируемого проекта, НИР, АП, ОКР не выполняются, риски финансирования не оцениваются.

Условные обозначения в оценке вероятности реализации вариантов финансирования планируемых работ в рассматриваемом методе, представленные в таблице 1, означают:

- 0 – реализуемый вариант,

-- 1 – нереализуемый вариант;

$P_r$  - вероятность финансирования проекта по одному из возможных  $A$  вариантов;

$P(A_a|A_o)$  - вероятность того, что проект, НИР, ОКР, АП финансируется. Управление финансовыми ресурсами и финансовыми рисками для вариантов  $A_1$  -  $A_4$  в рассматриваемом примере оценивается значением вероятности финансирования проекта 1,0. Отсутствие процесса управления финансовыми ресурсами для вариантов  $A_5$  и  $A_6$  оценивается вероятностью финансирования проекта 0,5, а для варианта  $A_7$  - 0,7;

Таблица 1 – Возможные варианты финансирования проекта, НИР, АП, ОКР и оценка вероятности их реализации

Варианты финансирования, $A$	$A_o$	$A_a$	$O_f$	$P(A_a A_o)$	$P(A_o)$	$P(A_a A_o) P(A_o)$
$A_1$	0	0	0	1	$P(A_o) P(A_a) P(O_f)$	$1 \times P(A_o) P(A_a) P(O_f)$
$A_2$	1	0	0	1	$[1 - P(A_o)] P(A_a) P(O_f)$	$1 \times P(A_a) [1 - P(A_o)] P(O_f)$
$A_3$	0	1	0	1	$[1 - P(A_a)] P(A_o) P(O_f)$	$1 \times [1 - P(A_a)] P(A_o) P(O_f)$
$A_4$	1	1	0	0	$[1 - P(A_a)] \times [1 - P(A_o)] P(O_f)$	0
$A_5$	0	0	1	0,5	$P(A_a) P(A_o) [1 - P(O_f)]$	$0,5 \times P(A_o) P(A_a) [1 - P(O_f)]$
$A_6$	1	0	1	0,7	$P(A_a) [1 - P(A_o)] [1 - P(O_f)]$	$0,7 \times P(A_a) [1 - P(A_o)] [1 - P(O_f)]$
$A_7$	0	1	1	0,5	$[1 - P(A_a)] P(A_o) [1 - P(O_f)]$	$0,5 \times [1 - P(A_a)] P(A_o) [1 - P(O_f)]$
$A_8$	1	1	1	0	$[1 - P(A_a)] [1 - P(A_o)] [1 - P(O_f)]$	0

$P(A_o)$  - вероятность финансирования проекта, НИР, АП, ОКР по основному (бюджетному, в частности)  $A_o$  варианту финансирования,

$P(A_a)$  - вероятность финансирования проекта, НИР, АП, ОКР по альтернативному  $A_a$  пути финансирования (рисунок 2),

$P(O_f)$  - вероятность нейтрализации рисков финансирования (результативность управления рисками финансирования).

При условии, что исключается одновременная реализация вариантов, представленных в таблице 1, т.е.  $P(A_o) + P(A_a) = 1$ , вероятность  $P_r$  финансирования проекта, или отождествляемая с ней результативность этапа финансирования, может быть рассчитана по формуле полной вероятности, суммирующей значения вероятностей реализации возможных вариантов финансирования:

$$P(A)_r = \sum_N P(A_a|A_o)P(A_o) = P(A_a)P(A_o)P(O_f) + P(A_a)[1 - P(A_o)]P(O_f) + [1 - P(A_a)]P(A_o)P(O_f) + 0,5 \times P(A_a)P(A_0)[1 - P(O_f)] + 0,7 \times P(A_a)[1 - P(A_a)][1 - P(O_f)] + 0,5 \times [1 - P(A_a)]P(A_o)[1 - P(O_f)] = (1 - P(A_o))[0,7 - 0,3P(O_f) - 1,2P(A_o) - 0,3P(A_o)P(O_f)] + P(A_o)[0,5 + P(O_f)] \quad (2)$$

Заменив обозначения вероятности  $P_r$ ,  $P(A_o)$ ,  $P(A_a)$ ,  $P(O_f)$  на показатели результативности деятельности по основному  $R(A_o)$ ,  $R(A_a)$ ,  $R(O_f)$  и альтернативному направлениям финансирования и управлению рисками, соответственно, получим формулу расчёта прогнозируемой результативности этапа финансирования проекта, НИР, ОКР, АП:

$$R(A)_f = [1 - R(A_o)][0,7 - 0,3R(O_f) - 1,2R(A_o) - 0,3R(A_o)R(O_f)] + R(A_o)[0,5 + R(O_f)] \quad (3)$$

Представленный на рисунке 3 график зависимости вероятности и результативности финансирования проекта по всем возможным варианта от значения вероятности финансирования по основному варианту финансирования позволяет отметить значимость управления рисками как управляющего элемента.

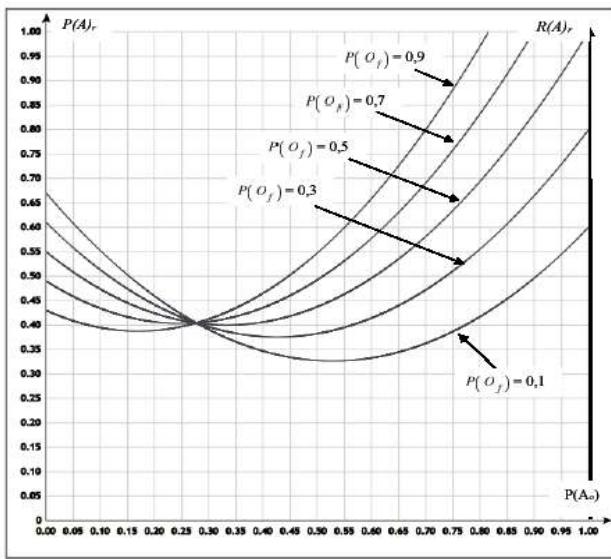


Рисунок 3 – Зависимость вероятности  $P_r$  и результативности  $R_f$  финансирования проекта от значений вероятности финансирования по основному и альтернативным вариантам и от результативности управления рисками, связанными с финансированием

Точка пересечения зависимостей вероятности финансирования и результативности управления финансированием от значений вероятности финансирования по основному варианту соответствует переходу от альтернативных вариантов, преобладающего при малых значениях вероятности финансирования по основному варианту, к основному при увеличении вероятности его реализации. Управляющая роль в таком переходе принадлежит управлению рисками финансирования. При различных соотношениях результативности основного и

альтернативного пути финансирования более высокая результативность управления рисками повышает итоговую результативность финансированию проекта.

Подобным образом анализируется деятельность на каждом из следующих этапов проекта, НИР, АП, ОКР.

Подобно рассмотренным примерам по той же модели оценивается вероятность достижения поставленной цели и прогнозируется результативность для каждого из этапов функциональной структуры планирования и управления проектом, НИР, ОКР, АП, представленной на рисунке 1.

Вероятность реализации каждого последующего этапа вычисляется в предположении, что все предшествующие этапы осуществились и достигли поставленной в них цели. Вероятность достижения цели проекта, НИР, ОКР, АП рассчитывается как вероятность совместной реализации последовательности случайных зависимых событий, т.е. как произведение вероятности реализации одного из них на условные вероятности реализации всех остальных.

$$P(Pr)_{\sigma} = P(ABCDEFGHK) = P(A)P(B|A)P(C|AB)P(D|ABC)P(E|ABCD) \times (4)$$

$$P(F|ABCDE)P(G|ABCDEF)P(H|ABCDEFG)P(K|ABCDEFGH),$$

где –  $P(Pr)_{\sigma} = P(ABCDEFGHK)$  - вероятность выполнения всех этапов проекта и достижения поставленных целей;

$P(A), P(B), P(C), P(D), P(E), P(F), P(G), P(H), P(K)$  - вероятности выполнения каждого из этапов проекта;

$P(B|A)$  - вероятность выполнения процесса обеспечения проекта, НИР, ОКР, АП ресурсами при условии выполнения предшествующего процесса финансирования;

$P(C|AB)$  - вероятность выполнения процесса поиска оптимального технического решения, включающего выбор и реализацию подхода к достижению цели работы - конструктивно-технических и технологических решений, для выполнения требований контракта (договора) на выполнение проекта, НИР, ОКР, при условии выполнения предшествующих процессов финансирования и обеспечения проекта ресурсами;

$P(D|ABC)$  - вероятность успешного формирование группы исполнителей работ по проекту при условии выполнения предшествующих этапов – выбора оптимального направления решения проблемы и его технических и технологических решений, финансирования и обеспечения проекта ресурсами;

$P(E|ABCD)$  - вероятность выполнения теоретической части проекта при условии выполнения предшествующих этапов – формирование группы исполнителей проекта, выбора оптимального направления достижения целей проекта и его технических и технологических решений, финансирования и обеспечения проекта ресурсами;

$P(F|ABCDE)$  - вероятность выполнения процесса моделирования процессов проекта, НИР, ОКР и их результатов при условии выполнения предшествующих этапов – формирование группы исполнителей проекта, выбора оптимального направления достижения целей проекта и его технических и технологических решений, финансирования и обеспечения проекта ресурсами, выполнения теоретической части проекта;

$P(G|ABCDEF)$  - вероятность выполнения экспериментальной части проекта при условии выполнения предшествующих этапов – формирование группы исполнителей проекта, выбора оптимального направления достижения целей проекта и его технических и технологических решений, финансирования и обеспечения проекта ресурсами, выполнения теоретической части проекта, моделирования процессов проекта, НИР, ОКР и их результатов;

$P(H|ABCDEFG)$  - вероятность выполнения верификация и валидация процессов и результатов проекта, НИР и ОКР в целом при условии выполнения предшествующих этапов – формирование группы исполнителей проекта, выбора оптимального направления достижения целей проекта и его технических и технологических решений, финансирования и обеспечения проекта ресурсами, выполнения теоретической части проекта, моделирования процессов проекта, НИР, ОКР и их результатов, работ по экспериментальной части проекта;

$P(K|ABCDEF GH)$  - вероятность выполнения необходимых действий по управление изменениями в проекте при условии выполнения предшествующих этапов - формирования группы исполнителей проекта, выбора оптимального направления достижения целей проекта и его технических и технологических решений, финансирования и обеспечения проекта ресурсами, выполнения теоретической части проекта, моделирования процессов проекта, НИР, ОКР и их результатов, работ по экспериментальной части проекта, верификация и валидация процессов и результатов проекта в целом.

В общем виде формула для расчета вероятности достижения цели проекта, НИР, ОКР, АП может быть представлена в следующем виде:

$$P\left(\sum_m T_m\right) = \prod_m [P(T_m) P(T_{m+1}|T_m) P(T_{m+2}|T_m T_{m+1})], \quad (5)$$

где  $P\left(\sum_m T_m\right)$  - вероятность выполнения последовательности  $T_m$  этапов в общей  $M$  их совокупности;

Оценка вероятности достижения цели проекта и прогнозирования его результативности рассмотренным методом включает выполнение последовательность следующих действий:

- разработка функциональной структуры проекта, НИР, ОКР, АП, учитывающей особенности предъявляемых к нему требований, влияющих факторов внешней и внутренней среды организации-исполнителя, предшествующего опыта подобных работ, опыта внешних организаций, выполняющих аналогичные работы;
- анализ возможных вариантов достижения поставленной цели, выбор основного и альтернативных вариантов для каждого из этапов выполнения работ по проекту;
- расчёт вероятности и результативности каждого из этапов проекта по формулам вычисления полной вероятности, учитывающей реализацию выбранных возможных вариантов выполнения действий для каждого из этапов проекта;
- выявление и реализация возможностей для повышения результативности этапов проекта;
- экспертная оценка и установление значений условной вероятности выполнения каждого из последующих этапов при реализации предшествующего этапа выполнения работ по проекту;
- расчёт вероятности реализации и результативности проекта в целом;
- выявление и реализация возможностей повышения уверенности (вероятности) достижения целей проекта и результативности проекта в целом, управление изменениями.

Априорная вероятность достижения цели как каждого из этапов, так и проекта в целом, полученная расчётом, дополняется учётом апостериорной информации в виде экспертных оценок условной вероятности выполнения этапов проекта, или/и данных, полученных в предшествующих работах.

Для представленной на рисунке 1 функциональной схемы проекта равновероятностная оценка возможности реализации одного из 4-х вариантов финансирования составляет 0,25.

При таком подходе в качестве основного варианта финансирования может быть выбран любой из 4-х равнозначных. Однако тематика работ, требования заказчика, имеющийся опыт, анализ внешней и внутренней среды, кадрового потенциала и другие факторы могут в значительной степени изменить предпочтения, изменить возможности реализации вариантов финансирования и дать более высокую оценку вероятности получения бюджетного финансирования, как в рассмотренном примере. Согласно результатам расчёта и представленным на рисунке 3 зависимостями, при вероятности бюджетного финансирования проекта  $P(A_o) = 0,95$  и результативности управления финансовыми рисками  $P(O_f) = 0,70$  полная вероятность  $P_r$  финансирования работ по проекту оказывается равной 0,93.

Последовательно продолжая вычисление вероятности выполнения каждого из этапов по формуле полной вероятности рассмотренным методом и соответствующих условных

вероятностей по формуле Байеса, получаются данные для вычисления вероятность достижения цели проекта по формуле (5).

И если, например, в результате выполненных расчётов будут получены такие значения вероятностей, как:  $P(A) = 0,95$ ,  $P(B|A) = 0,85$ ,  $P(C|AB) = 0,83$ ,  $P(D|ABC) = 0,82$ ,  $P(E|ABCD) = 0,80$   $P(G|ABCDEF) = 0,76$ ,  $P(H|ABCDEFG) = 0,75$ ,  $P(K|ABCDEFGH) = 0,73$ , то вероятность достижения цели проекта и соответственно, его прогнозируемая результативность составит 0,14.

Результаты оценки вероятности выполнения проекта, НИР, ОКР, АП, состоящего их последовательности событий, зависимых как от предшествующих этапов, так и от выбора возможных вариантов их выполнения, показывают, как заметно поэтапно утрачивается изначально высокая на первых этапах вероятность достижения поставленных целей при переходе от этапа к этапу. Количественная оценка вероятности позволяет не только дать прогноз результативности этапов и проекта в целом, исходя из анализа возможностей исполнителя, но и обоснованно установить такие требования, выполнение которых обеспечит необходимый уровень уверенности в возможности выполнения работы. Представленный метод позволяет решить и обратную задачу – исходя из заданного уровня вероятности выполнения требований к проекту, НИР, ОКР, АП последовательно установить требования к результативности (вероятности достижения целей) для каждого этапа работы.

Результаты оценки вероятности достижения цели проекта и каждого из его этапов позволяют оценить значимость и вклад каждого из них в конечный результат, выявить и использовать возможности для улучшения, необходимых изменений. Накопление и анализ результатов оценки вероятности достижения целей проектной деятельности создаёт информационную основу для более достоверного прогнозирования результатов в каждом последующем проекте.

### **Заключение**

Представленный метод управления и оптимизации проектной деятельности, включая постановку и выполнение научно-исследовательских, опытно-конструкторских работ, аванпроектов в отличие от известных применений по своему первоначальному назначению – анализу работоспособности технических объектов, основан на рассмотрении не двух, а произвольного количества возможных состояний объектов исследования. Кроме того, объектами анализа для представленного метода являются как организационно-технические системы, системы управления в целом, так и их процессы и другие виды деятельности на различных своих этапах. Метод даёт основание для обоснованного аналитическим анализом принятия решения относительно каждого из этапов проектной деятельности. Начиная с обоснования возможности принятия решения о готовности организации-исполнителя к выполнению требований заказчика на этапе планирования, определению источников финансирования и ресурсного обеспечения, формирования команды исполнителей, выбора направления теоретических исследований, моделирования и экспериментов до верификации и валидации результатов разработки и сдачи работы заказчику при выполнении работ метод позволяет гибко реагировать на влияющие факторы и адаптироваться к ним соответствующими изменениями.

Решение обратной задачи позволяет последовательно, дедуктивным подходом от «общего к частному» установить требования к показателям результативности и эффективности для каждого из этапов работы исходя из требований к результативности и эффективности работы в целом с учётом ограниченных временных финансовых и других ресурсов,

Дополняя организационно-методические методы управления проектной деятельностью, НИР, ОКР, АП возможностями аналитического анализа большого объёма данных взамен или в сочетании с экспертными оценками, а также в сочетании с другими методами прогнозирования [13] представленный метод создает возможность применения цифровых информационных технологий в области управления проектной деятельностью [14,15].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 51901.5— 2005 (МЭК 60300-3-1:2003) Менеджмент риска. Руководство по применению методов анализа надежности М.: ФГУП «Стандартинформ», 44 с.
2. ГОСТ Р ИСО 10006-2019 Менеджмент качества. Руководящие указания по менеджменту качества в проектах. М.: ФГУП «Стандартинформ», 32 с.
3. ГОСТ Р 54869-2011 Проектный менеджмент. Требования к управлению проектом М.: ФГУП «Стандартинформ», 9 с.
4. ГОСТ Р 54870-2011 Проектный менеджмент. Требования к управлению портфелем проектов М.: ФГУП «Стандартинформ», 8 с.
5. ГОСТ Р 54871-2011 Проектный менеджмент. Требования к управлению программой. М.: ФГУП «Стандартинформ», 8 с.
6. ГОСТ Р 15.000-2016 Система разработки и постановки продукции на производство. Основные положения. М.: ФГУП «Стандартинформ», 16 с.
7. ГОСТ Р 15.101-2021 Система разработки и постановки продукции на производство. Порядок выполнения научно-исследовательских работ. М.: ФГУП «Стандартинформ», 14 с.
8. ГОСТ Р 15.301-2016 Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция производственно-технического назначения. Порядок разработки и постановки продукции на производство, М.: ФГУП «Стандартинформ», 15 с.
9. ГОСТ РВ 15.203-2001 Система разработки и постановки продукции. Военная техника. Порядок выполнения опытно-конструкторских работ по созданию изделий и их составных частей. Основные положения. М.: 130 с.
10. ГОСТ РВ 15.103-2004 Система разработки и постановки продукции на производство военная техника порядок выполнения аванпроекта и его составных частей Основные положения. М.: 41 с.
11. ГОСТ РВ 15.105-2001 Система разработки и постановки продукции на производство. Военная техника. Порядок выполнения научно-исследовательских работ и их составных частей. Основные положения. М.: 27 с.
12. ГОСТ Р 55755-2013 Комплексные системы общих технических требований и контроля качества. Изделия электронной техники. Общие положения. М.: ФГУП «Стандартинформ», 12 с.
13. Сидорин В.В., Халилюлина Н.Б Прогнозирование и управление выполнением научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ Марковскими методами// Вестник СПГУТД. Серия 4. №3, С.58-62.
14. Сидорин В.В., Халилюлина Н.Б. Система управления проектированием и разработкой научкоемкой высокотехнологичной продукции на основе цифровых информационных технологий//Автоматизация в промышленности. М.2023, №3, С.
15. Сидорин В.В. Система менеджмента качества организации в цифровой экономике// Методы менеджмента качества, М.: 2018. № 2. С. 28-35.

**Сидорин Виктор Викторович**

Руководитель Учебного центра, профессор кафедры электроники Института перспективных технологий и индустриального программирования РТУ МИРЭА, Автономная некоммерческая организация «Институт испытаний и сертификации вооружения и военной техники» (АНО «ИнИС ВВТ»), 111524, Москва, Электродная улица, д.10, E-mail: wwsid@yandex.ru

**Халилюлина Надежда Борисовна**

Заведующая сектором системы менеджмента качества ИПФ РАН, аспирант кафедры электроники Института перспективных технологий и индустриального программирования РТУ МИРЭА, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грекова Российской академии наук», г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46, E-mail: nbh@ipfran.ru

---

V.V. SIDORIN, N.B. KHALILULINA

## FORECASTING THE EFFECTIVENESS OF PROJECT ACTIVITIES BASED ON THE TRUTH TABLE METHOD

**Abstract.** The approach to managing and optimizing project activities presented in this article is based on predicting its effectiveness based on an a priori assessment of the probability of achieving goals at each stage using a method based on the Truth Table Method (TTM) [1]. The method includes the development of the functional structure of the project, analysis of possible options and selection of the main and alternative ones for each of the project stages, calculation of the probability of achieving goals and the effectiveness of each of the project stages. The method identifies the strengths and weaknesses of the planned work on the process, as well as opportunities to improve their effectiveness.

*The use of the method will make it possible to exclude unpromising options for performing work at the planning stage, will allow optimizing resource costs and thereby increasing the efficiency of the project.*

**Keywords:** project, research work, development work, effectiveness, efficiency, conditional probability, life cycle, truth table.

## **BIBLIOGRAPHY**

1. GOST R 51901.5—2005 (IEC 60300-3-1:2003) Risk management. Guide to the application of reliability analysis methods M.: FSUE "Standartinform", 44 p.
2. GOST R ISO 10006-2019 Quality management. Guidelines for quality management in projects. M.: FSUE "Standartinform", 32 p.
3. GOST R 54869-2011 Project management. Requirements for project management M.: FSUE "Standartinform", 9 p.
4. GOST R 54870-2011 Project management. Requirements for project portfolio management M.: FSUE "Standartinform", 8 p.
5. GOST R 54871-2011 Project management. Requirements for program management. M.: FSUE "Standartinform", 8 p.
6. GOST R 15.000-2016 System for development and production of products. Basic provisions. M.: FSUE "Standartinform", 16 p.
7. GOST R 15.101-2021 System for the development and production of products. The procedure for carrying out research work. M.: FSUE "Standartinform", 14 p.
8. GOST R 15.301-2016 System for the development and production of products. Products for industrial and technical purposes. The procedure for developing and putting products into production, M.: FSUE "Standartinform", 15 p.
9. GOST RV 15.203-2001 Product development and production system. Military equipment. The procedure for performing experimental design work to create products and their components. Basic provisions. M.: 130 p.
10. GOST RV 15.103-2004 System for developing and putting products into production, military equipment, procedure for implementing a preliminary project and its components Basic provisions. M.: 41 p.
11. GOST PB 15.105-2001 System for developing and launching products into production. Military equipment. The procedure for carrying out research work and its components. Basic provisions. M.: 27 p.
12. GOST R 55755-2013 Integrated systems of general technical requirements and quality control. Electronic products. General provisions. M.: FSUE "Standartinform", 12 p.
13. Sidorin V.V., Khalilyulina N.B. Forecasting and management of research and development work using Markov methods // Bulletin of SPGUTD. Series 4. No. 3, pp. 58-62.
14. Sidorin V.V., Khalilyulina N.B. Management system for the design and development of knowledge-intensive high-tech products based on digital information technologies//Automation in industry. M.2023, No. 3, S.
15. Sidorin V.V. Quality management system of an organization in the digital economy // Methods of quality management, M.: 2018. No. 2. P. 28-35.

**Sidorin Victor Victorovich**

Head of the Training Center of the Autonomous Non-profit Organization "Institute of Testing and Certification of Weapons and Military Equipment"(ANO "InIS VVT"), Professor of the Department of Electronics of the Institute of Advanced Technologies and Industrial Programming RTU MIREA, 111524, Moscow, Electrode Street, 10 E-mail: wwsid@yandex.ru

**Khalilulina Nadezhda Borisovna**

Head of the Quality Management System Sector of the Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Postgraduate student of the Electronics Department of the Institute of Advanced Technologies and Industrial Programming of RTU MIREA RTU MIREA Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Research Center Institute of Applied Physics named after A.V. Gaponov-Grekhov Russian Academy of Sciences", Nizhny Novgorod, Ulyanova str., 46, E-mail: nbh@ipfran.ru

© В.В. Сидорин, Н.Б. Халилюлина, 2024

И.Г. МУЛЕНКО, О.В. ПУЧКА, В.В. РЯБКО, А.О. МИЛЕР, К.А. ПЕЛИПЕНКО

# АНАЛИЗ ОТЕЧЕСТВЕННОГО АНАЛОГА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УЧЕТА ПАРАМЕТРОВ НЕФТЕПРОДУКТОВ НА НЕФТЕБАЗАХ

**Аннотация** В данной статье описаны основные системы автоматического учета нефтепродуктов на нефтяных базах в Российской Федерации, представлены основные их технические характеристики. Описаны два типа автоматизированных систем: иностранного производства и отечественного производителя. Проанализированы основные технические (метрологические) характеристики, которые определялись на реально эксплуатирующихся резервуарах РВС-1000, представлены технические возможности системы *Tankvision* и «Струна +», проанализирована возможность импортозамещения измерительных систем для контроля основных параметров резервуаров, находящихся на нефтебазах.

**Ключевые слова:** измерительная система, погрешность, диапазон измерений, ГОСТ, поверка, резервуар, калибровочные таблицы, техническое устройство, измерительная система учета основных параметров вместимости резервуаров.

## Введение

Актуальность данной темы обозначена, во-первых, уходом с Российских рынков зарубежных производителей измерительной техники и поиском в нефтяном секторе аналогов измерительного оборудования, во-вторых, необходимостью достоверного учета количественных и качественных характеристик нефтепродуктов, играющих огромное значение в учетно-расчетных операциях за сырье [1].

На сегодняшний день на нефтебазах в Российской Федерации устанавливаются в основном резервуары [2] (в некоторых случаях средства измерений утвержденного типа) вместимостью: 400 м<sup>3</sup>, 1000 м<sup>3</sup>, 2000 м<sup>3</sup>- самые распространенные, менее распространены 5000 м<sup>3</sup> [3]. Практически на всех современных нефтебазах устанавливаются автоматические системы учета количественных и качественных характеристик нефтепродуктов. Принцип действия данных систем заключается в распределении датчиков на резервуарах с выводом от этих датчиков информацией на единый интерфейс оператора, контролирующего параметры [4,5,6,7].

## Основные виды измерительных систем

Система **Tankvision** установленная на резервуарах и состоящая из двух контроллеров: TS1 и TS2, которые делят резервуары по секциям между собой [8]. Для удобства, в программном обеспечении интегрированы быстрые интернет-ссылки доступа к контроллерам. После выбора одного из контроллеров и загрузки основного экрана системы **Tankvision**, запускается просмотр данных, для этого необходимо пройти по пути: Customised Groups (Пользовательские группы) → Static Groups (Статические Группы) → RGS для TS1 (RGS+PBC для TS2). В системе **Tankvision** осуществляется сбор данных резервуаров и контроль этих значений посредством трендов. Тренд представляет собой линейный график, отражающий последние изменения значений измеряемой величины в зависимости от времени. Исторический тренд можно просмотреть в модуле NXA820 (рисунок 1).



*Рисунок 1 - Головной модуль системы Tankvision, установленной на нефтебазах*

Он используется для представления значений и элементов выбранного резервуара в виде функции от времени в форме линейного графика. Предназначена данная опция для визуализации расхода и учета нефтепродуктов за конкретный отрезок времени для анализа, статистика и отчетных финансовых операций.

В системе для каждого элемента резервуара установлены параметры по умолчанию, которые возможно при необходимости изменить. Исторический тренд (в отличие от тренда в режиме реального времени) используется для вывода исторических данных, хранящихся в модуле Tankvision. На тренде можно вывести до 4 архивных значений.

Для просмотра исторического тренда в дереве навигации устанавливается режим Historical Trend (Исторический тренд). Появится экран, где будут отображены контролируемые параметры (рисунок 2).

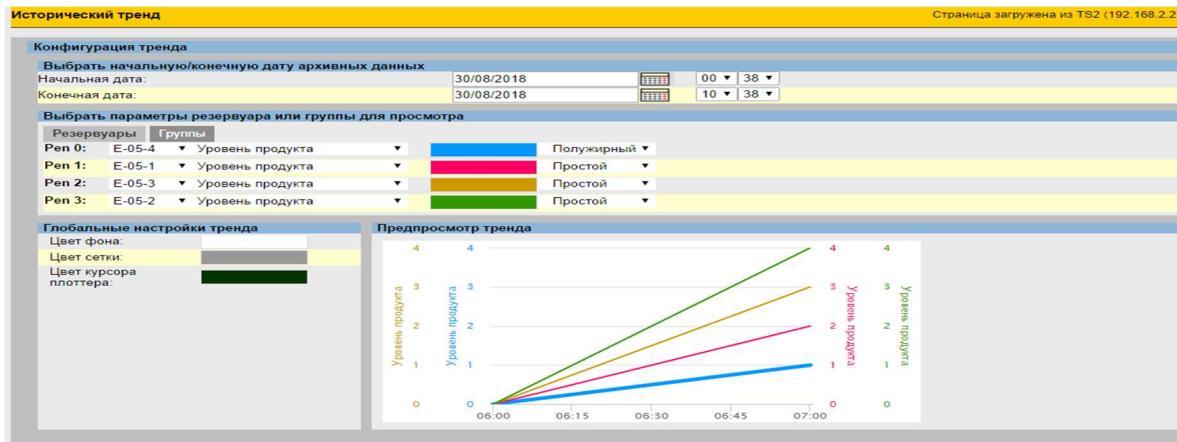


Рисунок 2-Основные контролируемые параметры нефтепродуктов контролируемые Tankvision

Возможна настройка выводимых параметров на экран, вид линии, толщину, цвет, а также фон и прочие атрибуты для построения графика.

После того, как все данные будут введены, появится исторический тренд. Имеется возможность выбрать период отображения, отключить выбранные параметры, а также просмотреть данные с тренда посредством всплывающего диалогового окна (рисунок 3).



Рисунок 3 - Исторический тренд Tankvision (изменение параметров за отрезок времени)

В системе Tankvision осуществляется управление расчетов запасов различных продуктов, хранящихся в резервуарном парке. Вычисление данных запаса, таких как объем, масса и т.д., выполняется на основе типа продукта, находящегося в резервуаре (рисунок 4).

Существует возможность после присвоения резервуарам типа нефтепродукта визуализации в табличном или графическом виде данные уровня, температуры и т. д.

Выбрать	Имя продукта	Тип продукта	ID продукта	Стандарт	Цвет продукта	VCF Метод/OIML R22 таблица	Метод RDC
<input checked="" type="radio"/>	БГС	Продукты перегонки	1144	API_ASTM		ASTM D1250-04 -Table 54B	None
<input checked="" type="radio"/>	ДТ	Продукты перегонки	48338	API_ASTM		ASTM D1250-04 -Table 54B	ASTM D1250-04 -Table 53B
<input checked="" type="radio"/>	Нефть	Сырая нефть	53054	API_ASTM		ASTM D1250-04 -Table 54A	ASTM D1250-04 -Table 53A

Рисунок 4 - Контролируемые нефтепродукты

Возможно дистанционное управление уровнемером через систему Tankvision. Для получения данных о плотности, необходимо установить в ПО уровнемер в режим измерения уровня.

После очередной поверки (калибровки) [4] резервуаров составляются новые градуировочные таблицы, которые необходимо будет ввести в систему Tankvision, для точного учета массы нефти в резервуарах. Для этого необходимо перевести градуировочные таблицы в электронный формат (желательно Excel или Word) и оптимизировать данные в табличный вид в формате xml, который распознает ПО. После получения готовых таблиц необходимо их загрузить в контроллер

Supervisor - Supervisor		English	русский	About	Help	Logout
Home		Page is loaded from TSI (192.168.88.28)				
29.09.2018 14:55 (GMT+05)						
Tanks ( 15 )		Select	Tank Name	Location	Tank Shape	Product
Customized Groups ( 1 )		<input checked="" type="radio"/>	PBC-1	ПСЛ	Tank with Fixed Roof, without Stilling	Нефть
Products ( 1 )		<input checked="" type="radio"/>	PBC-2	ПСЛ	Tank with Fixed Roof, without Stilling	Нефть
Reports		<input checked="" type="radio"/>	PBC-3	ПСЛ	Tank with Fixed Roof, without Stilling	Нефть
Transfers		<input checked="" type="radio"/>	Tank-4	Terminal-1	Tank with Fixed Roof, without Stilling	Нефть
Trends		<input checked="" type="radio"/>	Tank-5	Terminal-1	Tank with Fixed Roof, without Stilling	Нефть
KPI Dashboard		<input checked="" type="radio"/>	Tank-6	Terminal-1	Tank with Fixed Roof, without Stilling	Нефть
Configuration		<input checked="" type="radio"/>	Tank-7	Terminal-1	Tank with Fixed Roof, without Stilling	Нефть
Tanks		<input checked="" type="radio"/>	Tank-8	Terminal-1	Tank with Fixed Roof, without Stilling	Нефть
Customized Groups		<input checked="" type="radio"/>	Tank-9	Terminal-1	Tank with Fixed Roof, without Stilling	Нефть
Products		<input checked="" type="radio"/>	Tank-10	Terminal-1	Tank with Fixed Roof, without Stilling	Нефть
Tank Status		<input checked="" type="radio"/>	Tank-11	Terminal-1	Tank with Fixed Roof, without Stilling	Нефть
		<input checked="" type="radio"/>	Tank-12	Terminal-1	Tank with Fixed Roof, without Stilling	Нефть
		<input checked="" type="radio"/>	Tank-13	Terminal-1	Tank with Fixed Roof, without Stilling	Нефть
		<input checked="" type="radio"/>	Tank-14	Terminal-1	Tank with Fixed Roof, without Stilling	Нефть
			test	ПСЛ	Tank with Fixed Roof, without Stilling	Нефть
<a href="#">Modify</a>						

Рисунок 5 - Окно загрузки градуировочных таблиц

Таблица 1 - Основные метрологические характеристики измерительной системы Tankvision

Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений уровня продукта, мм	$\pm 1, \pm 2, \pm 3$ (в зависимости от выбранного уровнемера)
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений границы раздела жидкких сред, мм:	$\pm 2$ в диапазоне измерений не более 1 м $\pm 0,2$ % от измеренного значения в диапазоне измерений более 1 м $\pm 2$ в диапазоне измерений не более 1 м $\pm 4$ в диапазоне измерений более 1 м $\pm 3$
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений температуры продукта и паров, °C	$\pm 0,2; \pm 0,5$ (в зависимости от выбранного датчика измерения температуры продукта)
Пределы допускаемой приведенной погрешности измерений гидростатического давления, % от ДИ	$\pm 0,075; \pm 0,05; \pm 0,025$
Пределы допускаемой приведенной погрешности измерений давления паров в резервуаре, % от ДИ	$\pm 0,15; \pm 0,075$
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений средней плотности продукта, кг/м3	$\pm 1$
Пределы допускаемой относительной погрешности вычислителя, %	$\pm 0,01$

Одним из основных отечественных аналогов Tankvision на нефтебазах, на сегодняшний день, является измерительная система «Струна+», предназначенная для измерения уровня, температуры, плотности, давления, вычисления объема, массы светлых нефтепродуктов и сжиженного газа (СУГ) в одностенных и двустенных резервуарах, сигнализации наличия подтоварной воды, повышения уровня пожарной и

экологической безопасности, автоматизации процессов учета нефтепродуктов на АЗС, АГЗС, нефтебазах. Системы могут применяться так же на предприятиях пищевой и химической промышленности, а также в качестве эталонных средств измерений II разряда согласно Государственной поверочной схеме для средств измерений уровня при градуировке резервуаров [8].

Основные метрологические характеристики Tankvision указаны в таблице 1.

Система соответствует требованиям, предъявляемым к особо взрывобезопасному электрооборудованию подгруппы II В с видом взрывозащиты «Искробезопасная электрическая цепь уровня ia». Является средством измерения утвержденного типа. Ниже приведены основные технические характеристики [9] в таблице 2.

**Таблица 2 - Основные технические характеристики системы измерительные «Струна+»**

<b>Диапазоны измерений уровня (мм)</b>	
— ППП без плотномера и с погружным плотномером для АЗС, АПЖ	от 120 до 4000
— ППП без плотномера и с погружным плотномером для АГЗС	от 200 до 4000
— ППП с плотномером с кожухом для АЗС	от 250 до 4000
— ППП с погружными плотномерами для нефтебаз (НБ) и АПЖ	от 150 до 18000
— ППП для градуировки резервуаров (ГР)	от 10 до 4000 (9000)
— ДУТ для расширительного бачка резервуара	от 50 до 350 (400)
<b>Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений уровня, мм:</b>	
— ППП в диапазоне до 4 метров и для ГР до 9м	± 1
— ППП в диапазоне свыше 4 метров (для НБ и АПЖ)	± 2
— ДУТ	± 5
Температурный диапазон эксплуатации датчиков, $^{\circ}\text{C}$	от -40 до +55
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений температуры, $^{\circ}\text{C}$	±0,5
<b>Диапазоны измерений плотности погружным плотномером, кг/м<sup>3</sup>:</b>	
— 1 диапазон (бензин АИ-80) для АЗС	от 690 до 760
— 2 диапазон (АИ-92, АИ-95, АИ-98, АИ-100) для АЗС	от 725 до 795
— 3 диапазон (керосин) для АЗС	от 765 до 840
— 4 диапазон (дизельное топливо) для АЗС	от 810 до 880
— 5 диапазон (сжиженный газ) для АГЗС	от 499 до 599
— 6 диапазон (АИ-80, АИ-92, АИ-95, АИ-98, АИ-100) для НБ	от 679 до 803
— 7 диапазон (керосин и ДТ) для НБ	от 760 до 880
— 8 другие диапазоны по заказу (ширина диапазона не более 150)	от 450 до 1500
<b>Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений плотности, кг/м<sup>3</sup>:</b>	
— с плотномером с кожухом	±0,5

— с погружным плотномером	$\pm 0,5$
<b>Пределы допускаемой относительной погрешности измерений, %:</b>	
— объёма	$\pm 0,4$
— массы нефтепродукта и СУГ до 120т	$\pm 0,65$
— массы нефтепродукта и СУГ от 120т и более	$\pm 0,5$
Сигнализация наличия подтоварной воды для АЗС, мм: — 1 порог «предупреждение» — 2 порог «авария»	25 80
Диапазон измерений уровня подтоварной воды (для НБ), мм	от 80 до 300
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений уровня воды (для НБ), мм Диапазоны измерений объёмной доли: — паров бензина и СУГ, %НКПР — метана, % об. доля	$\pm 2$ от 0 до 60 от 0 до 2,5
Диапазон измерений избыточного давления, МПа — для АГЗС, трубопроводов — для межстенного пространства резервуаров АЗС	От 0 до 1,6 от 0 до 0,25
Пределы приведённой погрешности измерений давления для АГЗС, %	$\pm 0,7$
Количество контролируемых резервуаров (одной центральной частью)	До 16
Длина кабеля от резервуара до операторской, не более, м	1200
<b>Ток нагрузки каналов управления, А:</b>	
— силовые цепи (оптосимистор) 220В, 50Гц	0,1...0,5
— маломощные цепи (твердотельное реле) 220В, 50Гц	0,01...0,1
— цепи DC 40В и AC 27В, 50Гц (твердотельное реле)	до 0,5



Рисунок 6 - Вид составных частей «Струна+»

Принцип распределения, обработки и сбора информации от датчиков (рисунок 6) позволяет увеличивать количество измерительных каналов до 64-х без потери производительности (по всем каналам данные обновляются в течение трёх секунд). Система включает от одного до четырёх устройств распределительных (УР), имеющих до 16-ти измерительных каналов. В системе может быть до 64 каналов управления (силовые 220В 50 Гц или релейные выходы). Информация может отображаться на локальном блоке индикации и внешних средствах отображения в соответствии с коммуникационными возможностями системы.

Проведем сравнительный анализ 2-х систем, при измерениях вместимости резервуаров РВС-1000 геометрическим методом, на 2-х разных нефтебазах, двумя разными измерительными системами, описанных в данной статье и эксплуатирующихся в настоящее время в Белгородской и Курской областях как указано в таблице 3.

Таблица 3 - Сопоставление данных о вместимости РВС -1000 двух измерительных систем

Уровень наполнение см	Вместимость РВС -1000 № 27 (Нефтебаза -1) с использованием Tankvision 2023 г.	Вместимость РВС -1000 № 31 (Нефтебаза-2) с использованием «Струна+» 2023 г.	
		Вместимость, м <sup>3</sup>	Вместимость, м <sup>3</sup>
20,8	39,256	39,012	0,62
150	272,501	272,14	0,13
300	543,482	542,984	0,09
450	814,313	813,745	0,07
600	1085,478	1085,129	0,03
750	1356,99	1356,868	0,01
900	1628,783	1628,888	-0,01
1050	1900,641	1901,041	-0,02
1190	2154,569	2154,969	-0,02

При комплектации системы блоком БСР1 (блок сервера) добавляются следующие возможности «Струна+».

- удаленный мониторинг системы через веб-браузер по протоколу HTTP;
- удаленное изменение метрологических параметров системы по протоколу HTTP (тип продукта, смещение уровня, поправки по плотности, загрузка градуировочных таблиц и тд);
- удаленное изменение алгоритмов контроля и управления;
- регистратор событий подсистемы управления и модификации параметров ППП;
- возможность подключения термопринтера для печати текущих показаний измеряемых параметров.

#### Анализ системы учета на нефтебазах и выводы по результатам данной статьи

Из проведенных измерений вместимости двух одинаковых резервуаров РВС-1000, эксплуатируемых в одинаковых климатических и окружающих условиях двумя разными измерительными системами, мы можем видеть не существенное изменение показателей вместимости, а это одна из главных технических (метрологических) характеристик резервуаров, при использовании их как в качестве обычных технических устройств, так и в качестве средств измерений утвержденного типа. Анализ данных измерений показывает актуальность эксплуатации отечественного аналога измерительной системы Tankvision измерительной системой «Струна+».

Существенная разница в принципах расчетов заключается в том, что такие физические величины как объем и масса в измерительной системе «Струна+» выражаются косвенными измерениями через выражение измеряемых величин, полученных с датчиков уровня, температуры и плотности. В измерительной системе Tankvision возможен контроль учета и расхода нефтепродуктов, хранящихся в резервуарах, в том числе данные могут использоваться для документальных сведений по учетно-расчетным операциям за сырье. Возможен контроль и просмотр расходных операций за конкретный период времени.

### Заключение

Полученные результаты анализа данной статьи могут лежать в основу выбора измерительной системы основных параметров резервуаров и нефтепродуктов нефтебазами. Важно отметить, что большой составляющей частью расчета данных параметров являются метрологические характеристики резервуаров [10].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон «Об обеспечении единства измерений» от 26.06.2008 г. N 102-ФЗ.
2. Приказ Министерства промышленности и торговли Российской Федерации от 11.02.2020 № 456 «Об утверждении требований к содержанию и построению государственных поверочных схем и локальных поверочных схем, в том числе к их разработке, утверждению и изменению».
3. ГОСТ 31385–2016. Межгосударственный стандарт. «Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия».
4. ГОСТ Р 8.996–2020. Национальный стандарт Российской Федерации. Государственная система обеспечения единства измерений. «Резервуары стальные вертикальные цилиндрические. Методика калибровки электронно-оптическим методом».
5. ГОСТ 8.570–2000. Межгосударственный стандарт. Государственная система обеспечения единства измерений. «Резервуары стальные вертикальные цилиндрические Методика поверки».
6. ГОСТ 34100.3–2017. Межгосударственный стандарт. Неопределенность измерения. Часть 3.
7. Рекомендации по метрологии Р 50.2.028–2003. Алгоритмы построения градуировочных характеристик средств измерений состава веществ и материалов и оценивание их погрешностей (неопределенностей). ИПК Издательство стандартов, 2003.
8. Техническое описание и руководство по эксплуатации. Система измерительная Tankvision для резервуаров. <https://avinsystems.ru/wp-content/uploads/2019/10/tehnicheskoe-opisanie-nxa820-nxa821-nxa822-ti00419gru.pdf>
9. Техническое описание и руководство по эксплуатации. Система измерительная «Струна +» для резервуаров.
10. ГОСТ 1510–84. Межгосударственный стандарт. «Нефть и нефтепродукты».

**Муленко Илья Геннадьевич**  
Белгородский государственный  
технологический университет  
им. В. Г. Шухова, г. Белгород  
Аспирант кафедры  
«Стандартизация и управление  
качеством»  
308012, г. Белгород, ул.  
Костюкова, д. 46  
Мобильный телефон: 8-985-451-  
63-64  
Электронная почта: il-  
mulenko@mail.ru.

**Милер Александр Олегович**  
Начальник 1204 регионального  
центра метрологии  
Минобороны России, г. Санкт-  
Петербург. Мобильный  
телефон: 8-962-257-62-50.  
Электронная почта:  
aomiler39@yandex.ru

**Пучка Олег Владимирович**  
Белгородский государственный  
технологический университет им. В.  
Г. Шухова, г. Белгород  
Доктор технических наук,  
профессор кафедры  
«Стандартизация и управление  
качеством»  
308012, г. Белгород, ул. Костюкова,  
д. 46  
Мобильный телефон: 8-904-530-44-  
30  
Электронная почта: oleg8a@mail.ru

**Пелипенко Кирилл Александрович**  
Белгородский государственный технологический университет им. В. Г.  
Шухова, г. Белгород.  
Магистрант кафедры «Стандартизация и управление качеством»  
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46  
Мобильный телефон: 8-908-124-02-30.  
Электронная почта: kirillpelipenko2015@gmail.com.

**Рябко Владислав Владимирович**  
Белгородский государственный  
технологический университет им.  
В. Г. Шухова, г. Белгород  
Магистрант кафедры  
«Стандартизация и управление  
качеством»  
308012, г. Белгород, ул.  
Костюкова, д. 46  
Мобильный телефон: 8-951-137-89-  
07.  
Электронная почта:  
vi281412@mail.ru

I.G. MULENKO, O.V. PUCHKA, V.V. RIABKO, A.O. MILER, K.A. PELIPENKO

### ANALYSIS OF DOMESTIC ANALOG OF THE AUTOMATED SYSTEM OF OIL PRODUCTS PARAMETERS ACCOUNTING AT OIL DEPOTS

**Abstract** This article describes the main systems of automatic accounting of petroleum products at oil bases in the Russian Federation and presents their main technical characteristics. Two types of automated systems are described: foreign-made and domestic-made. The main technical (metrological) characteristics that were determined on the really expatriating RVS-100 tanks are analyzed, the technical capabilities of the Tankvision and Struna + systems are presented,

*the possibility of import substitution of measuring systems for monitoring the main parameters of tanks located at oil depots is analyzed.*

**Keywords:** measuring system, GOST, verification procedure, verification, tank, calibration tables, technical device, uncertainty, measuring system for accounting for the main parameters of tank capacity.

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Federal'nyj zakon «Ob obespechenii edinstva izmerenij» ot 26.06.2008 g. N 102-FZ.
2. Prikaz Ministerstva promyshlennosti i torgovli Rossiijskoj Federacii ot 11.02.2020 № 456 «Ob utverzhdenii trebovaniij k soderzhaniyu i postroeniyu gosudarstvennyx poverochnyx sxem i lokal'nyx poverochnyx sxem, v tom chisle k ix razrabotke, utverzhdeniyu i izmeneniyu».
3. GOST 31385–2016. Mezhgosudarstvennyj standart. «Rezervuary vertikal'nye cilindricheskie stal'nye dlya nefti i nefteproduktov. Obshchie texnicheskie usloviya».
4. GOST R 8.996–2020. Nacional'nyj standart Rossiijskoj Federacii. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmerenij. «Rezervuary stal'nye vertikal'nye cilindricheskie. Metodika kalibrovki e'lektronno-opticheskim metodom».
5. GOST 8.570–2000. Mezhgosudarstvennyj standart. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmerenij. «Rezervuary stal'nye vertikal'nye cilindricheskie Metodika poverki».
6. GOST 34100.3–2017. Mezhgosudarstvennyj standart. Neopredelennost' izmereniya. Chast' 3.
7. Rekomendacii po metrologii R 50.2.028–2003. Algoritmy postroeniya graduirovochnyx xarakteristik sredstv izmerenij sostava veshhestv i materialov i ocenivanie ix pogreshnostej (neopredelennostej). IPK Izdatel'stvo standartov, 2003.
8. Texnicheskoe opisanie i rukovodstvo po e'kspluatacii. Sistema izmeritel'naya Tankvision dlya rezervuarov. <https://avinsystems.ru/wp-content/uploads/2019/10/technicheskoe-opisanie-nxa820-nxa821-nxa822-ti00419gru.pdf>
9. Texnicheskoe opisanie i rukovodstvo po e'kspluatacii. Sistema izmeritel'naya «Struna +» dlya rezervuarov.
10. GOST 1510–84. Interstate standard. "Oil and petroleum products".

**Mulenko Ilya Gennadyevich**

Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. V.G. Shukhov Belgorod State Technological University, Belgorod.

Postgraduate student of the department "Standardization and Quality Management"

46, Kostyukova str., Belgorod, 308012.

Cell phone: 8-985-451-63-64

E-mail: il-mulenko@mail.ru.

**Puchka Oleg Vladimirovich**

Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. V.G. Shukhov Belgorod State Technological University, Belgorod.

Doctor of Technical Sciences, Professor of "Standardization and Quality Management" Department 46 Kostyukova St., Belgorod, 308012. Cell phone: 8-904-530-44-30

E-mail: oleg8a@mail.ru

**Ryabko Vladislav Vladimirovich**

Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Belgorod, Russia. V.G. Shukhov Belgorod State Technological University, Belgorod, Russia

Master's student of "Standardization and Quality Management" department

46, Kostyukova str., Belgorod, 308012.

Cell phone: 8-951-137-89-07.

E-mail: vi281412@mail.ru

**Miler Alexander Olegovich**

Head of 1204 Regional Metrology Center of the Ministry of Defense of Russia, St. Petersburg.

Cell phone: 8-962-257-62-50.

E-mail: aomiler39@yandex.ru

**Pelipenko Kirill Alexandrovich**

Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, St. Petersburg, Russia. V.G. Shukhov Belgorod State Technological University.

Master's student of "Standardization and Quality Management" Department

46 Kostyukova St., Belgorod, 308012.

Cell phone: 8-908-124-02-30.

E-mail: kirillpelipenko2015@gmail.com

© И.Г. Муленко, О.В. Пучка, В.В. Рябко, А.О. Милер, К.А. Пелипенко, 2024

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ЗАДАЧАХ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ АРМИРОВАННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

**Аннотация.** В статье анализируются различные подходы по использованию технологий искусственного интеллекта в обработке массива данных поступающих в ходе диагностики и мониторинга технического состояния полимерных армированных труб. Оценивается эффективность методов и специфика технологических решений по их применению. Определяются перспективные возможности искусственного интеллекта в обработке поступающей информации. Рассматривается особенность организации нейронной сети, ее структура, последовательность анализа данных. Представляются процедуры обучения нейронной сети для оценки технического состояния труб. Разрабатывается концепция модульного проектирования программного обеспечения, отвечающего за оценку технического состояния полимерных армированных трубопроводов, основанная на системах диагностики и мониторинга.

**Ключевые слова:** полимерные армированные трубы; дефекты; отказы; искусственный интеллект; нейронные сети; БПЛА; оценка технического состояния.

### Введение

Одним из ключевых направлений развития современного трубопроводного транспорта является использование новых материалов и соединений, обеспечивающих большую надежность и безопасность, а также обладающих меньшей ресурсоемкостью. Широкое распространение целых классов новых типов труб (полимерных, базальтопластовых, стеклопластиковых, полимерно-армированных и др.) привело к необходимости разработки специальных методов контроля их технического состояния. Таким образом, возникла потребность в новых диагностических комплексах, комплексах удаленного контроля и специализированном программном обеспечении [1].

Говоря о диагностических методах, используемых для неразрушающего контроля различных объектов следует отметить, что на сегодняшний день не выработано прорывных направлений, которые бы базировались на новых физических принципах. Диагностические устройства по-прежнему используют технологии, разработанные в XX веке. Для подобного прорыва требуется качественный переход, с последующим переводом фундаментальных разработок в плоскость практического применения. Вместе с тем, в последние десятилетия значительно усилились средства удаленного контроля технического состояния, а также математической и программной обработки поступающей диагностической информации. В частности, это вызвано нетривиальностью задач - необходимостью поиска (за неимением новых методов диагностики) подходов, позволяющих имеющимися способами получать высококачественные данные об изменении физико-химических параметров различных объектов трубопроводного транспорта. Современные методы искусственного интеллекта внесли свежую струю в существующие алгоритмы обработки данных по различным объектам контроля и в частности по неметаллическим трубопроводам. Так, например, алгоритмы машинного обучения могут быть использованы для анализа данных, полученных от датчиков, установленных на трубопроводах. Эти алгоритмы могут помочь обнаружить аномалии в работе трубопроводов и предсказать возможные проблемы. В свою очередь, глубокое обучение - как подвид машинного обучения, может использовать нейронные сети для анализа данных. Нейронные сети могут быть обучены на больших объемах данных, чтобы обнаруживать сложные паттерны и предсказывать состояние трубопроводов. Перспективно и использование технологии компьютерного зрения. В частности, для анализа изображений и видео, полученных от камер, установленных на трубопроводах. Эти технологии могут помочь обнаружить повреждения, трещины, расслоения или другие дефекты [2]. Крайне перспективны робототехнические решения, данные аппараты могут быть использованы для инспекции линейных сооружений и обнаружения проблем. Роботы могут быть оснащены датчиками и камерами для сбора данных и анализа состояния трубопроводов. Допустимо и применение IoT-технологии. Они могут быть использованы для сбора данных от датчиков,

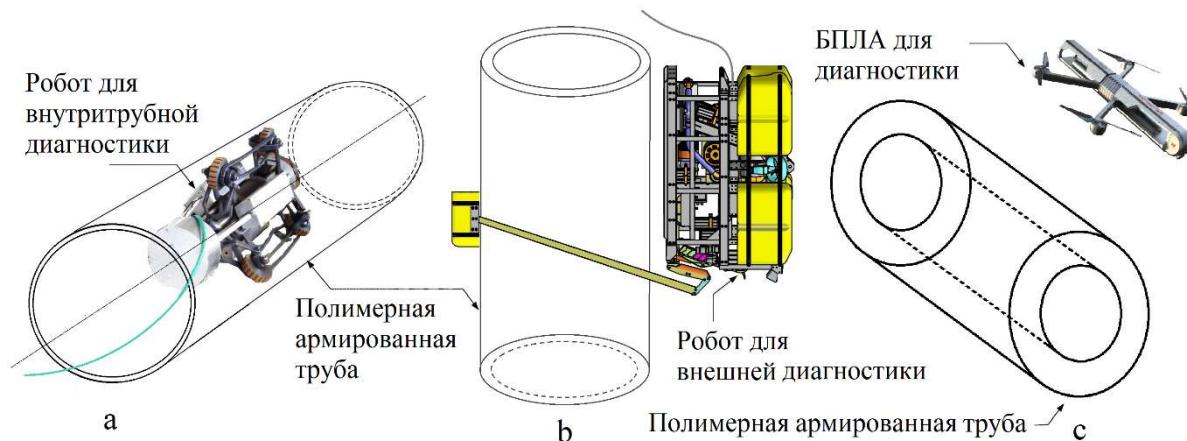
установленных на трубопроводах, и передачи этих данных в облако для анализа и принятия решений.

Рассмотрим ряд современных подходов по оценке технического состояния полимерных армированных труб, базирующихся на технологиях искусственного интеллекта. Определим узкие места каждого из методов, представим сильные стороны и перспективы развития.

### Основная часть.

#### Обзор технологий диагностирования и мониторинга технического состояния полимерных армированных труб с последующим применением искусственного интеллекта для обработки данных

Полимерные армированные трубы представляют собой многокомпонентную систему, состоящую из полимерной матрицы и армирующего слоя, либо металлической ленты. Полимерная матрица играет роль протектора, а армирующий слой воспринимает нагрузки. Многокомпонентность системы (в особенности если применены несколько последовательных слоев из разного материала), сильно усложняет процесс оценки ее технического состояния и диагностики. Научным сообществом сформировало несколько технических решений, позволяющих проводить контроль технического состояния трубопроводов данного типа. Вне зависимости от вида решения все они основаны на получении данных о текущем состоянии объекта контроля и на проведении сравнительного анализа между фактическим и исходным состоянием объекта. Рассмотрим подробнее методы, связанные с применением специализированных диагностических комплексов (рисунок 1).



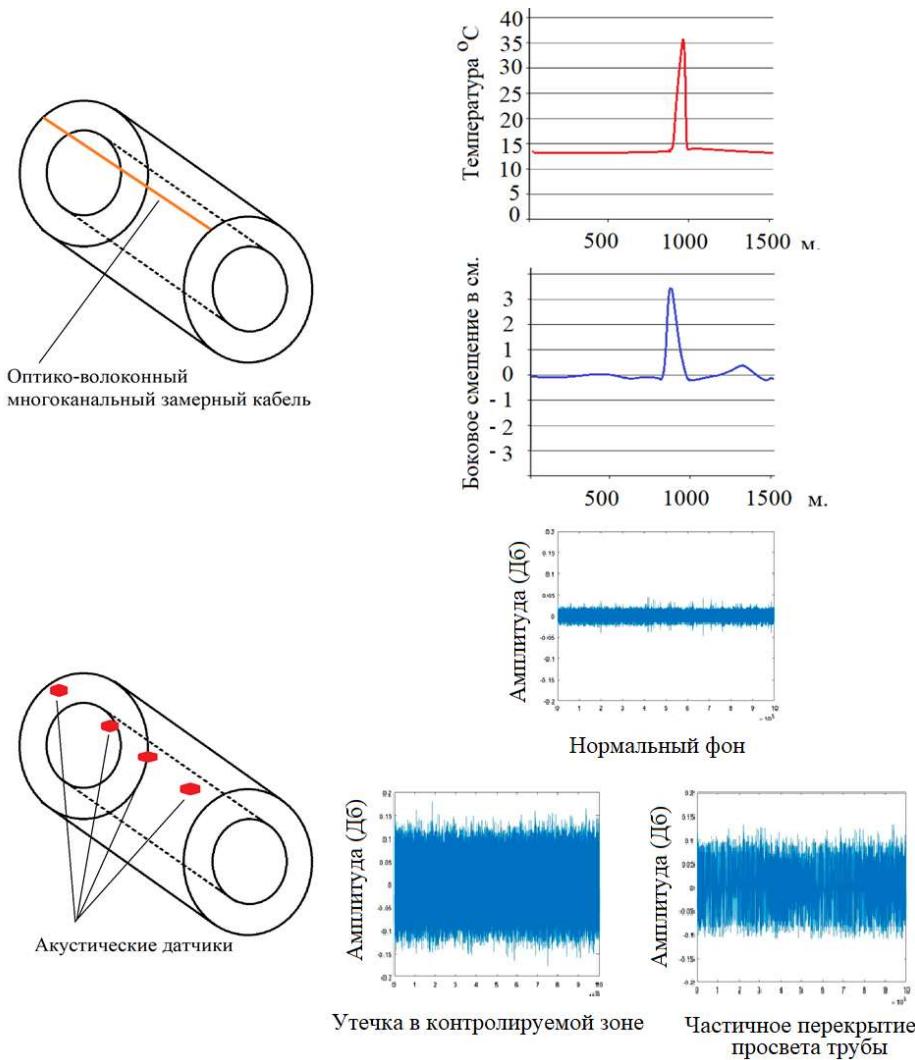
**Рисунок 1 – Примеры диагностики:**

*а – Внутритрубная диагностика (комплекс методов неразрушающего контроля); б – Внешняя диагностика в морских условиях (радиография и оптика); в – Внешняя диагностика с помощью БПЛА (оптика и термометрия)*

Данный способ диагностики полимерных армированных трубопроводов заключается в неразрушающем контроле радиографическим, ультразвуковым, магнитометрическим, вихревоковым и оптическим методами. При этом в зависимости от месторасположения трубы и наличия к ней доступа со стороны внешней либо внутренней стенок выбирается, либо комбинация из радиографического и оптического методов, либо комбинация из всех остальных методов кроме радиографии (проведение внутритрубной диагностики) [3]. Получаемые перечисленными диагностическими методами данные требуют последующей обработки. Для этой операции можно использовать приложения раздела искусственного интеллекта – методы компьютерного зрения. Поступающие диагностическая информация преобразуется в 2D, а затем и в 3D изображения. В полученных изображениях методами сегментации выделяются дефектные области, соотнося их фактические параметры с требуемыми в нормативной документации, на основе чего можно судить о допустимости либо не допустимости выявленных дефектов. Однако, отметим, что не только внутритрубная диагностика будет позволять выявлять технические несоответствия. В случае размещения полимерных армированных труб на поверхности, возможно осуществлять их облет беспилотными летательными аппаратами (БПЛА), снабженными видеокамерой и

тепловизионным оборудованием. Получаемые с БПЛА данные могут быть также обработаны специализированной нейронной сетью, что позволяет выявить отклонения в геометрии полимерного армированного трубопровода, изменение в его позиционировании, определить зоны более или менее выраженного теплового потока (в зависимости от транспортируемой среды).

Однако приведенное обследование труб с последующим распознаванием дефектов методами компьютерного зрения не является единственным возможным направлением применения искусственного интеллекта в оценке технического состояния. Другим эффективным подходом может быть применение многоканального оптического замерного кабеля или установка акустической системы контроля (рисунок 2).



**Рисунок 2 - Использование оптико-волоконного многоканального замерного кабеля и акустических датчиков для контроля технического состояния полимерного армированного трубопровода**

В случае с данной потоковой информацией уже используются не методы компьютерного зрения, а интеллектуальный анализ данных и методы прогностики и предиктивной аналитики технических систем. Сам принцип работы системы заключается в постоянном получении потока данных по всей длине либо оптико-волоконного кабеля, либо по всем акустическим датчикам, расставленным по полимерной армированной трубе [4]. Передаваемые данные могут быть температурными показателями по точкам замеров, показателями скорости потока, показателями шума, показателями бокового смещения относительно осевой линии [5]. В данном случае получается передача численной информации требующей обработки и сравнения с эталонными показателями, а также служащей исходными данными для разработки прогностических моделей.

Рассмотрим технические и технологические особенности организации обработки представленных видов данных искусственным интеллектом. Поступающая информация может быть представлена в виде изображений различного типа, графиков или в виде потока численных данных.

### **Алгоритмы применения технологий искусственного интеллекта в обработке диагностической информации (внутритрубная и внешняя диагностика)**

Искусственный интеллект по своей сути выполняет те-же операции, что и человеческий мозг, только в своей основе он имеет фактически неограниченные машинные мощности. Как и человеческий мозг он способен выполнять три основных функции: распознавание, осмысление и действие. В контексте оценки технического состояния объекта на сегодняшнем этапе развития значимы функции распознавания и осмысления. Обе эти функции выделяются в такие группы технологий искусственного интеллекта как: компьютерное зрение, машинное обучение и интеллектуальный анализ данных. Рассмотрим применение данных технологий искусственного интеллекта подробнее и оценим их особенности и взаимосвязь в решении проблемы оценки технического состояния полимерных армированных трубопроводов.

Дефектность трубопроводной системы есть по сути отклонение ее технического состояния от нормативных требований. Таким образом целью внутритрубной либо внешней диагностики является определение зон с аномальными физическими характеристиками. В результате используемая нейронная сеть должна уметь распознавать естественный (нормальный) фон / характеристики и вычленять из него отклонения. Отметим, что поступающая диагностическая информация может быть подана на нейронную сеть в разном виде: изображения, диаграммы зависимостей, гистограммы, кластеры, графики [5]. Таким образом искусственный интеллект должен быть обучен на нескольких моделях одновременно, и иметь несколько библиотек дефектов для сопоставления с получаемой информацией (Рисунок 3). При этом на этапе обработки информации необходимо предусмотреть выполнение следующих операций: удаление шума, улучшение изображения, контрастирование. Это может быть выполнено при помощи функций двухстороннего фильтра, метода определения пятен, расщечивания, преобразования. При выполнении операций непосредственно с изображениями (Рисунок 3.) осуществляется ряд процедур по извлечению признаков: определение границ (адаптивное, с использованием градиентов), удаление фона, фильтрация изображения, выделение, аппроксимация контура, выпуклая оболочка множества точек. Когда же признаки извлечены, можно переходить к определению объектов и их классификации (ориентируясь на существующие библиотеки). Здесь основными инструментами могут стать: сегментирование, кластеризация, метод главных компонент, метод опорных векторов [6].

Для обследования трубопроводов из полимерных армированных труб можно применять различные внутритрубные зонды и беспилотные летательные аппараты, снабженные оптическими системами. В оптике можно наблюдать большую номенклатуру дефектов и отклонений и в последние годы основной проблемой было обучение искусственного интеллекта методам их распознавания.

На данный момент эта задача решается методами глубокого обучения нейронной сети и инструментами сегментации на основе компьютерного зрения. В частности, для определения дефектных зон используется такой вид обучения как извлечение признаков. Путем обучения он позволяет определить соответствующие преобразования, которые следует применить к входным оптическим данным, чтобы получить представления для выполнения целевой задачи, такой как распознавание дефекта на внутренней или внешней поверхности трубы, классификация изображения по допустимости размещения элементов и т.д.

Среди различных подходов для решения обозначенной задачи, выявления и классификации дефектов и отклонений в полимерных армированных трубопроводах может использоваться CNN - тип искусственной нейронной сети, созданной на основе зрительной коры головного мозга животных. Он состоит из нескольких уровней, которые обрабатывают данные в иерархическом порядке. CNN может выполнять задачи не только компьютерного зрения и локализации объектов, но и их многокритериальной оценки [7]. Так к формируемой двумерной CNN, подсоединяется база данных классификации изображений, сеть модифицируется для извлечения представлений различных элементов из входных

изображений (например, для вычисления наличия или отсутствия конструкционных элементов трубопроводов или дефектов различного типа).

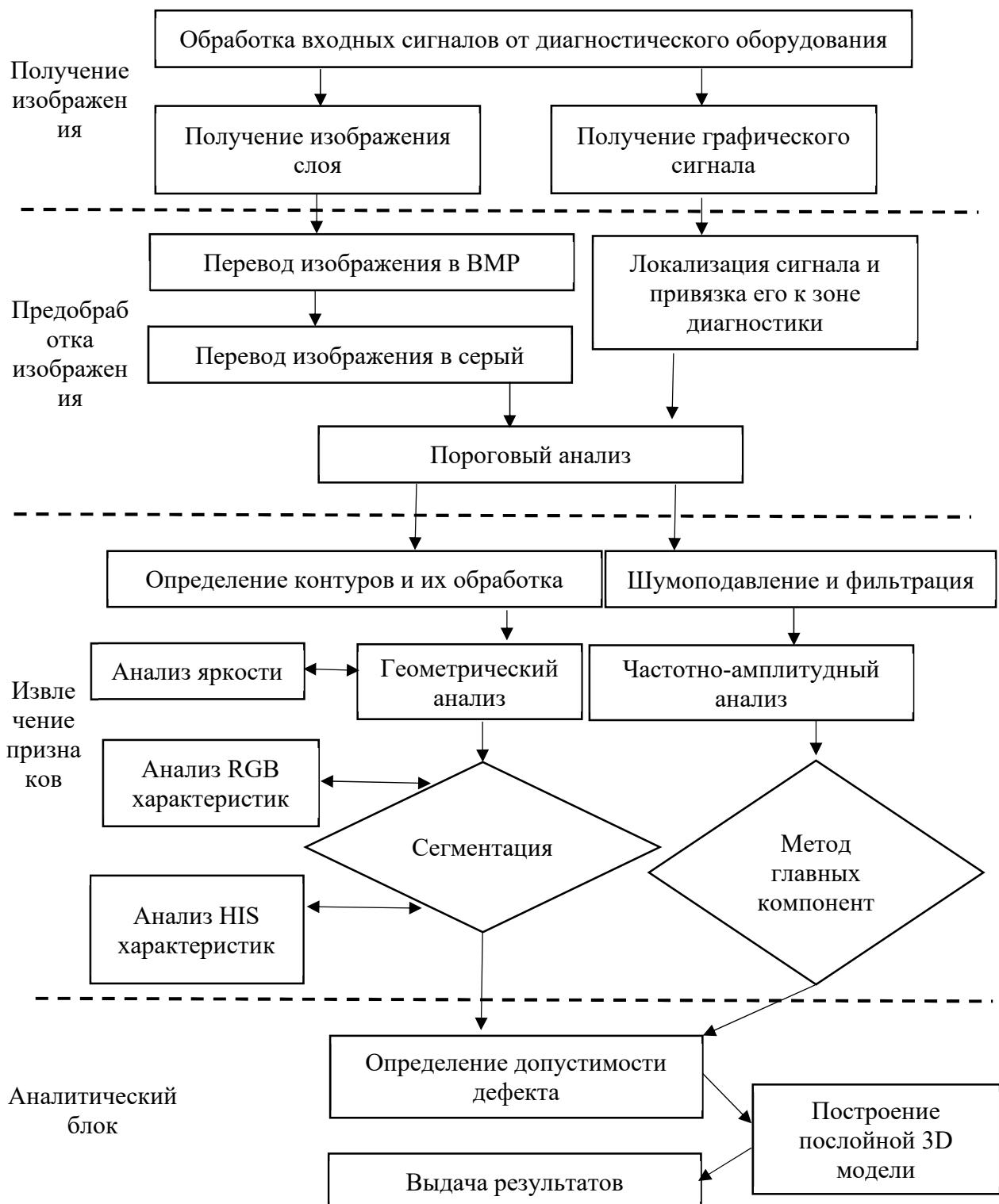


Рисунок 3 - Алгоритм выявления дефектов методами компьютерного зрения и графовой нейронной сети

Затем используется ОС-SVM для определения того, какие именно из вычисленных зон аномальны. Может быть осуществлен и следующий ход - предварительно сформированная CNN объединяется с рассеянным самокодером, который может быть сформирован для обеспечения двухуровневой экстракции признаков. На выходе CNN используется первый гауссовский классификатор, чтобы классифицировать области изображения как нормальные, ненормальные или подозрительные [8]. В формируемой нейронной сети могут быть

использованы методы, основанные на трансферном обучении. Они не требуют размеченной базы данных для извлечения признаков, и их результаты (в различных отраслях) с точки зрения обнаружения и локализации аномальных объектов довольно высокие. Однако зависимость этих методов от предварительно обученных моделей накладывает определенную жесткость, что ограничивает их в возможности последующего улучшения. Этот недостаток стал причиной появления подходов, основанных на генеративных моделях и глубоком обучении.

В последние годы использование генеративно-состязательных сетей (GAN) в машинном обучении значительно возросло. GAN — это алгоритм обучения без учителя. Он состоит из двух подсетей, генератора и конкурирующего дискриминатора. На этапе обучения генератор пытается сгенерировать убедительные данные, чтобы обмануть дискриминатор, который, в свою очередь, пытается определить, являются ли сгенерированные образцы реальными или поддельными. Разработчиками были также предложены пространственно-временные противоборствующие сети (STAN) для решения задачи обнаружения видеоаномалий. Он состоит из двух подсетей, генератора, состоящего из слоев свертки, Con-vLSTM и слоев деконволюции, а также дискриминатора, состоящего из слоев трехмерной свертки. Обнаружение аномальных зон может осуществляться непосредственно дискриминатором или генератором. Однако лучшие результаты получаются при объединении решений одновременно двух сетей [9].

Подходы к обнаружению аномальных зон, основанные на реконструктивных, прогнозирующих или генеративных моделях, обычно основаны на предположении, что модель, сформированная на основе нормальных изображений, не сможет реконструировать, предсказывать или генерировать аномальные изображения. Поэтому порог ошибки реконструкции, прогнозирования или вырождения часто используется для обнаружения аномальных зон на изображениях. Можно использовать сеть Deep One-Class (DOC). Ее можно обучать сквозным образом, используя только примеры обучения одного класса. Сеть получается путем замены softmax, обычно используемого в CNN, на OC-SVM. Таким образом, сеть оптимизируется для извлечения компактных представлений и их оперативной классификации [9]. Еще одним шагом по повышению эффективности распознавания методами компьютерного зрения дефектов может стать трансферное обучение предварительно обученных сетей для обнаружения аномалий. При этом важно учитывать две группы параметров: компактность и описание извлекаемых признаков.

Эти два аспекта могут существенно способствовать уменьшению внутриклассовой дистанции и увеличению межклассовой дистанции, что повысит точность распознавания и классификации дефектов в оптическом диапазоне. В целом этого можно добиться, обучая две нейронные сети. После обучения такие сети способны предоставлять как описательные, так и компактные представления. Эти сети можно применять с классификатором одного класса, чтобы отделить элементы целевого класса (типа дефекта) от выбросов.

Искусственный интеллект обучается только с использованием последовательных кадров обычного RGB и оптического потока. Формируемая архитектура должна быть способна создавать новые представления оптического потока из последовательных исходных кадров. Подход должен быть основан на сочетании слоев свертки и деконволюции, способных не только автоматически генерировать изображения оптического потока, но и извлекать компактные характеристики из исходного и оптического изображений потока на этапе тестирования [10]. Классические вычисления оптического потока тогда избегаются и заменяются быстрой и эффективной нейронной сетью на основе свертки/деконволюции. Предложенная процедура может создавать поток оптических изображений с аномальными структурами (OFE). При этом формирование выборки изображений с аномальными структурами во время фазы обучения будет осуществляться согласно следующему уравнению:

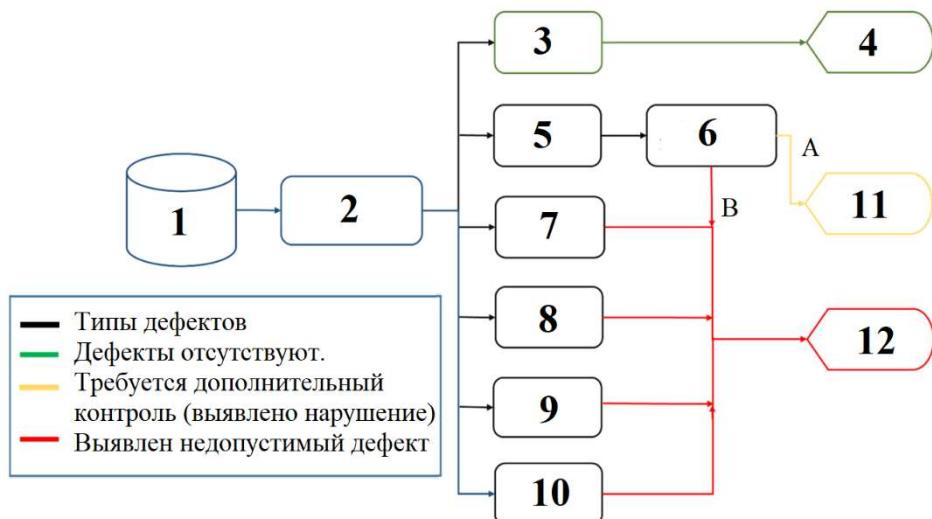
$$OFE = \frac{1}{n} \sum_1^n (\varphi(i) - \varphi'(i))^2 \quad (1)$$

где  $\varphi(i)$  - исходный оптический поток,  
 $\varphi'(i)$  - генерируемый оптический поток.

Благодаря такой архитектуре сеть сможет правильно отсортировывать изображения с дефектами. Количество слоев контактирования и конволюции должно регулироваться опытным

путем, с учетом быстродействия искусственного интеллекта и точности распознавания дефектов.

В целом подобные же подходы по организации искусственного интеллекта возможны и для распознавания дефектов и несоответствий с внешней стороны полимерных армированных трубопроводов, уже не при помощи внутритрубных дефектоскопов, а с привлечением БПЛА. В этом случае будет формироваться следующая система (рисунок 4) [11].



**Рисунок 4 - Алгоритм выявления дефектов методами компьютерного зрения при диагностике полимерных армированных трубопроводов с помощью БПЛА:**

1 – Видео данные с БПЛА; 2 - Вид обработки информации (тепловой, оптический); 3-Дефекты не идентифицированы; 4- Система в рабочем состоянии; 5- Выявлены деформированные элементы; 6 – Проверка допустимости отклонений; 7 – Нарушение положения элемента системы; 8 -Отсутствие элемента системы; 9 -Трецины; 10 –Сломанные элементы; 11 –Сигнал о несоответствии; 12 –Сигнал об аварийной ситуации; А – Отклонения предельные; В – Отклонения больше чем допустимые

Однако, как отмечено в рисунке 3, входные сигналы диагностического оборудования могут быть представлены не только изображениями в оптическом диапазоне, но и в виде комплекса графиков, требующих дешифрования (в случае применения иных методов диагностики – ультразвуковой, магнитный и др.).

Рассмотрим в качестве примера обработки результатов внутритрубной диагностики принципы построения нейронной сети и обработки результатов на примере ультразвукового обследования полимерных армированных труб.

Так применяемая для обработки данных ультразвукового дефектоскопа искусственная нейронная сеть (ИНН) должна состоять из сети узлов, соединенных с помощью регулируемых весов. Весовые коэффициенты могут быть скорректированы таким образом, чтобы сеть изучала отображение, представленное набором примеров пар ввода-вывода. Теоретически ИНН может воспроизводить любую непрерывную функцию  $F^n(p)F^m$ , где  $n$  и  $m$  – числа входных и выходных узлов. В большинстве диагностических программ используются алгоритмы метода обратного распространения ошибки. Существует множество вариантов классических алгоритмов метода обратного распространения ошибки, предполагающих фиксированную архитектуру ИНН [10]. Они обучают только весовые коэффициенты в архитектуре, которая включает в себя как связность, так и функцию передачи узлов. Разработчиками часто предпринимаются попытки создания автоматического проектирования архитектуры ИНН, например, использование конструктивных и уплотняющих алгоритмов. Как правило, конструктивный алгоритм начинается с минимальной сети и при необходимости добавляет новые слои, узлы и связи при обучении, в то время как алгоритм сжатия делает обратное, т.е. удаляет ненужные слои, узлы и связи при обучении.

В настоящее время в дефектоскопии нейронные сети преимущественно применяются в классификационных задачах. Нейронная сеть предъявляет высокие требования к данным и их

проверке, когда на их основе сформированы соответствующие библиотеки, в процессе обучения сети создается процедура автоматической классификации. Архитектура сети обратного распространения это один из возможных и эффективных типов архитектур для рассматриваемых задач. Сети, используемые для классификации, обычно имеют столько входных нейронов, сколько требуется определить признаков, и столько выходных нейронов, сколько классов, подлежит выделению. В алгоритме обратного распространения, основанном на методе градиентного спуска, каждый нейрон слоя связан с каждым нейроном в предыдущем и следующем слое.

Данная методика основана на том, что классификация рассматривается как замкнутая система, с хорошо известными входами и выходами [12]. Общий класс такой системы может быть представлен следующей моделью пространства состояний:

$$\left\{ \begin{array}{l} x(t+1) = f[x(t), i(t)] \\ o(t) = g[x(t), i(t)] \\ i: \text{ входящий вектор} \\ o: \text{ исходящий вектор} \\ x: \text{ корректировка от непредвиденных событий} \end{array} \right.$$

В случае построения нейронной сети для ультразвуковой диагностики входы представлены огибающей формой дефектов (амплитудой и частотой), а выходы имеют 2 класса плоских и объемных дефектов. Внутритрубная диагностическая стратегия заключается в получении отраженного от дефекта огибающего импульсного эха, как относительно максимального положения преобразователя отражения, так и относительно изменения расстояния между преобразователем и дефектом. Приведем несколько наиболее общих ожидаемых характеристик распознаваемых дефектов для полимерной матрицы (таблица 1).

Таблица 1 - Взаимосвязь ультразвуковой эхограммы и дефекта в полимерной матрице

Тип дефекта	Эхо-форма	Эхо-сигнал при перемещении преобразователя		
		Mvt -боковое сканир.	Mvt – вертикальное сканир.	Вокруг дефекта
Пористость	Неровный сигнал	Эхо сигнал быстро пропадает	Эхо сигнал быстро отклоняется	Эхо-сигнал постоянен
Твердые включения	Резкие перепады амплитуды в начале	Эхо сигнал присутствует, но его амплитуда резко меняется	Эхо сигнал резко пропадает	Эхо-сигнал постепенно снижается
Мелкие расслоения	Мелкие эхо сигналы с жестким фронтом	Общий эхо сигнал присутствует с слабыми переотражениями	Те-же показатели при перемещении дефектоскопа	
Расслоение	Первичный сигнал от дефекта и сигнал отражения практически слиты	Падение амплитуды и слитие сигналов	Резкое падение амплитуды сигнала и интенсивности	Резкие границы изменения амплитуды
Раковины и выбоины	Высокая амплитуда, смазанная по краю	Дерганская, неровная амплитуда	Резкое падение амплитуды	Резкие перемены амплитуды
Трещина	Наложение высоких эхо-сигналов с жестким фронтом	Резкое эхо с жестким фронтом	Низкая глубина дефектного сигнала, наложение на сигнал ввода	Переотражение импульсов, повышенные помехи

Выбор архитектуры нейронной сети для конкретной задачи обычно требует некоторых предварительных знаний о сложности проблемы. Однако топология нейронной сети напрямую влияет на два наиболее важных фактора обучения.

Как теоретические исследования, так и моделирование показывают, что сети большего размера, чем необходимо, имеют тенденцию переполнять обучающие данные и, следовательно, иметь плохую генерализацию, в то время как слишком маленькая сеть будет испытывать трудности с изучением обучающих выборок. В настоящее время не существует формальных методов настройки или выбора правильной структуры сети. Ее построение во многом осуществляется путем подбора, хотя возможно, например, применить специальную нейронную сеть, созданную для поиска и построения оптимальной архитектуры (Neural Architecture Search) – метод поиска по нейронной архитектуре.

На вход сетки по распознаванию дефектов ультразвуком подается график формы дефектного сигнала полученной с помощью численного осциллографа и представленный в векторном виде. На выходе из нейронной сети может быть получено логическое представление плоского или объемного дефекта, его типоразмер и критичность.

Алгоритм обучения начинает со случайных начальных весов и обучается на разных дефектограммах (промаркированных эхограммах), соответственно. Все соединения в сети адаптивны и обучаются с помощью алгоритма обратного распространения [12]. Поскольку алгоритм обратного распространения радиоволн требует дифференцируемости вдоль пути сигнала сети, можно использовать в качестве передаточной следующую функцию:

$$F = 1/(1 + e^{-\sum a_j x_i})$$

где  $a$  - вес;

$x$  - вход единицы измерения (Герц),

$b$  - выбирается случайным образом в  $[-0.5, 0.5]$  в начальном состоянии и изменяется во время обучения.

Таким образом, когда  $x$  представляется сети и распространяется дальше, состояние  $x_j$  в каждом слое имеет вид:

$$x_j = \tanh\left(\frac{a_j}{2}\right)$$
$$a_j = b_j + \sum_{i=1, nl} b_{ij} x_i$$

где  $b_j$  - вес  $x_j$ , соединяющего  $x_i$  предыдущего слоя с  $x_j$  текущего слоя,

$nl$  - количество узлов на слое.

Для вычисления весовых коэффициентов, первоначально они должны быть обучены на основе случайного набора начальных весовых коэффициентов. Для этого используется алгоритм обратного распространения ошибки при обучении, с минимизирующим процессом целевой функции. В частности, это можно получить путем вычисления среднеквадратичной функции ошибки (MSE) между фактическим выходом  $x_j$  и желаемым  $x_d$ .

Минимизация целевой функции обычно выполняется с помощью процедуры градиентного спуска, которая требует вычисления градиента целевой функции по отношению к весам связей, и обратное распространение является как раз эффективным способом вычисления этого градиента [12]. Модификация весов выполняется по алгоритму, содержащему следующую целевую функцию:

$$E(x) = 1/2 \sum_{j=1, nl} (x_d - x_j)^2$$

где  $x_j$  – фактический выход данных;

$x_d$  – ожидаемый выход данных;

$nl$  - количество узлов на слое.

После выделения искусственным интеллектом дефектов на получаемых эхограммах, в качестве надстройки можно применить, например, метод главных компонент, который позволит распределить дефекты на допустимые и недопустимые, что является необходимым шагом для оценки технического состояния полимерных армированных труб.

Диагностика армирующего слоя и распознавание дефектов в нем производиться по аналогичным принципам (с учетом подачи на ввод информации в виде графиков функций). При этом конечно используется иная нейронная сетка, и новые библиотеки дефектов, по армирующему слою (отметим, что их должно быть несколько в зависимости от типа армировки и принципа ее расположения внутри полимерной матрицы).

### Технологии искусственного интеллекта в обработке данных систем постоянного мониторинга технического состояния полимерных армированных трубопроводов

Искусственный интеллект может применяться не только для проведения дешифровки результатов неразрушающего контроля полимерных армированных труб, его можно использовать и для обработки данных получаемых в ходе технического мониторинга. Оба потока данных служат основой для оценки технического состояния трубопроводной системы. В случае с данными диагностики — это результаты непосредственного, однократного, наблюдения за структурным состоянием элементов системы. Данные же мониторинга представляют собой более опосредованную, но постоянную информацию от контролируемого линейного объекта [13].

Для обработки данных мониторинга с различных систем акустических, термических и вибрационных датчиков (рисунок 2.) возможно использовать нейронные сети типа RBF (радиально-базисной функции). Данная сеть на входе имеет ряд радиальных базисных функций и параметров нейронов. На выходе же выдаются функции активации. Основной проблемой при практическом применении радиально-базисной нейронной сети, для нелинейной аппроксимации (а в большинстве случаев будет формироваться именно она), состоит в правильном выборе количества нейронов в скрытом слое и значение параметра  $\sigma$  в функции активации [14]. Взаимосвязь между измеряемыми в ходе мониторинга параметрами и функциями активации может в общем виде быть выражена через функцию активации  $i$ -го скрытого нейрона:

$$f_i(X) = \exp \left[ -\frac{\|X - C^{(i)}\|^2}{2 \cdot \sigma^2} \right]$$

где  $C^{(i)}$  – центр активации  $i$ -го нейрона;

$\|\cdot\|$  – длина вектора,

$\sigma$  – параметр функции активации, характеризующий размер области, в которой каждый нейрон реагирует на входной сигнал  $X$  максимально возможным образом.

По мимо радиально – базисной нейронной сети, для обработки данных мониторинга может быть применена рекуррентная нейронная сеть. Чаще всего такие сети имеют большое число скрытых нейронов и могут проводить аппроксимацию любой динамической системы [15]. При этом на выходе рекуррентная сеть может быть типа DT-RNN (с глубоким преобразованием входного сигнала в скрытный) или DO-RNN (с глубоким преобразованием скрытого сигнала в выходной) [16]. Оба подхода обработки данных мониторинга в своей основе будут иметь структуру, состоящую из входного, скрытого и выходного слоя нейронов (рисунок. 5). Также для обработки данных поступающих с систем мониторинга может быть применена и вероятностная нейронная сеть (PNN).

Говоря об анализируемой сетью информации на входе с датчиков будут получены данные о частоте акустических колебаний, температуре, скорости потока, смещении труб от базового положения. С учетом срока эксплуатации труб, их типоразмеров, характеристик материалов и нагрузок, можно осуществить расчет ряда вероятностных параметров (позволяющих с определенной точностью проводить оценку технического состояния трубопроводной системы, в том числе из полимерных армированных труб).

В общем виде (для стальных труб в том числе с полимерными покрытиями) рассматриваемые показатели могут быть определены по ряду формул (8-11) [17,18,19]. Однако отметим, что данный формульный аппарат требует адаптации к использованию для полимерных армированных труб, поскольку официальной и утвержденной методической базы по расчету вероятностных показателей надежности, утечки, потери полимерной матрицы и др. для данного оборудования на настоящий момент нет.

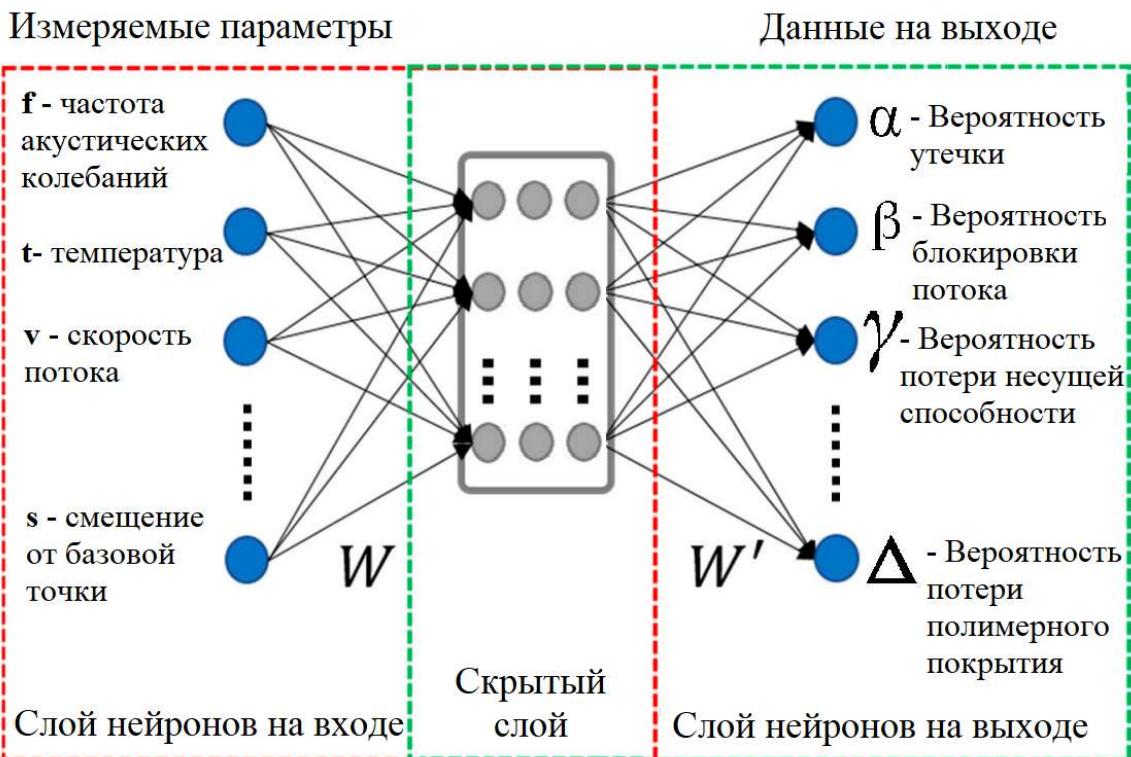


Рисунок 5 - Структура модели многослойной нейронной сети, дающей вероятностную характеристику надежности полимерной армированной трубы на основе комплекса параметров

$$\alpha_i = \alpha_i^{L_o} \alpha_j^H \alpha_k^c$$

где  $\alpha_i^{L_o}$  – вероятность образования дефектного разрыва;  
 $\alpha_j^H$  – вероятность утечки в напорном режиме;  
 $\alpha_k^c$  – вероятность утечки в самотечном режиме.

$$\beta = 1 - e^{-\omega_b t}$$

где  $\omega_b$  – параметр потока отказов;  $t$  – время.

$$\gamma(t) = \exp \left\{ -\frac{t_\sigma}{2\pi\sqrt{\sigma_s^2 - \sigma_R^2}} \exp \left[ -\frac{(\langle R \rangle - \langle S \rangle)^2}{2(\sigma_s^2 - \sigma_R^2)} \right] \right\}$$

где  $t$  – время;

$\sigma_R$  – стандартная функция несущей способности материала;

$\sigma_s$  – стандартная функция максимальных напряжений;

$\langle R \rangle$  – математическое ожидание несущей способности материала трубы;

$\langle S \rangle$  – математическое ожидание максимальных напряжений в трубопроводе

$$\Delta(t) = \left[ 1 - e^{-\left(\frac{H}{a}\right)^b} \right]^M$$

где  $H$  – толщина матрицы;

$a$  – параметр масштаба функции распределения;

$b$  – параметр формы функции распределения;

$M$  – показатель масштаба поверхности.

Полученные на выходе данные (как и в случае с результатами диагностики) могут служить основой системы оценки технического состояния полимерного армированного трубопровода. Вместе с тем, для полноценной работы подобной системы важно наличие соответствующих алгоритмов и нейросетевых структур по прочим элементам (отводам, соединениям, арматуре).

Далее отдельный блок, требующий внимания – это построение архитектуры взаимосвязи между различными видами сетей и унификация передаваемых данных, их финальная консолидация и обработка, с привязкой к нормативным требованиям и анализу рисков. Применительно к полимерным армированным трубам подобные алгоритмы,

архитектуры нейронных сетей, библиотеки и программные комплексы уже находятся в стадии разработки. Их создание, апробация и внедрение, с учетом развития систем мониторинга, диагностики и искусственного интеллекта одно из приоритетных направлений в развитии современных методов управления надежностью систем трубопроводного транспорта.

### Выводы

Развитие технологии искусственного интеллекта открывает широкие перспективы в решении задач диагностики и мониторинга технического состояния различных нефтегазовых устройств и объектов. Вместе с тем, на текущем этапе развития науки и техники ключевым вопросом является развитие нейросетевых структур, их обучение, создание на их основе научно детерминированных и одновременно адаптивных взаимосвязей между методической базой неразрушающего контроля, физикой процессов, методами оценки технического состояния объекта и риск-менеджментом.

На текущий момент существуют отдельные методические и технические решения для ультразвуковой и вихревоковой внутритрубной диагностики полимерных армированных труб, для их внешнего обследования с помощью БПЛА. Вместе с тем разработка комплексных решений диагностики и мониторинга, на основе технологии искусственного интеллекта остается нерешенной задачей. Не решены полноценно и задачи оценки уровня надежности трубопроводных систем, оценки уровня риска эксплуатации. Данные вопросы (в контексте применения к ним систем искусственного интеллекта) также находятся в разработке. Кроме того, обозначенные методические и программные решения не кодифицированы с точки зрения нормативно-технических требований и это очередной вектор работы (обеспечение возможности применения результатов отчетов по оценке технического состояния, полученных по результатам обработки искусственным интеллектом данных диагностики и мониторинга, в выдаче заключения по промышленной безопасности объекта трубопроводного транспорта).

Однако все описанные задачи не отменяют перспективности данного направления работ, а лишь подчеркивают ее. Создание подобных полноценных систем искусственного интеллекта, вместе с широким внедрением в отрасль полимерно-армированных труб как транспортной компоненты приведет к значительным изменениям в используемом оборудовании и в реализуемых сервисных услугах по обеспечению его надежности. Фактически это будет обозначать переход на качественно новый уровень трубопроводного транспорта и его технико-технологического сервиса.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Herrera, R.H., Christensen, P., & Elvers, A. (2019). Machine learning in pipeline inspection: applications of supervised learning in non-destructive evaluation. *CINDE Journal*, 40(5), 6-11.
2. Barradas, I., Garza, L.E., Morales-Menendez, R., Vargas-Martínez, A. (2009). Leaks Detection in a Pipeline Using Artificial Neural Networks. In: Bayro-Corrochano, E., Eklundh, JO. (eds) *Progress in Pattern Recognition, Image Analysis, Computer Vision, and Applications. CIARP 2009. Lecture Notes in Computer Science*, vol 5856. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-10268-4\\_75](https://doi.org/10.1007/978-3-642-10268-4_75)
3. Lemma, T.A., Muniandy, D., Ahsan, S. (2020). Automated Pipeline Diagnostics Using Image Processing and Intelligent System. In: Awang, M., Emamian, S., Yusof, F. (eds) *Advances in Material Sciences and Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-8297-0\\_16](https://doi.org/10.1007/978-981-13-8297-0_16)
4. M. T. Egorovna and V. T. Nikolaevna, "Artificial intelligence in problems of leak definition from the oil pipeline," 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS), Tomsk, Russia, 2014, pp. 1-4, doi: 10.1109/MEACS.2014.6986846.
5. Monika Steidl, Michael Felderer, Rudolf Ramler, The pipeline for the continuous development of artificial intelligence models—Current state of research and practice, *Journal of Systems and Software*, Volume 199, 2023, 111615, ISSN 0164-1212, <https://doi.org/10.1016/j.jss.2023.111615>.
6. Алекперова С.Т., Ревазов А.М. Практика применения технологий искусственного интеллекта при планировании мероприятий по обеспечению безопасности объектов добычи и транспорта углеводородов // Территория Нефтегаз. 2022. № 1-2. С. 40-44.
7. Белостоцкий М.А., Куньлинь Л., Короленок А.М., Короленок В.А. Формирование интеллектуальной системы управления ремонтом на линейной части магистральных нефтепроводов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2022. Т. 12. № 4. С. 368-375. DOI: 10.28999/2541-9595-2022-12-4-368-375
8. Hamdi, S.; Bouindour, S.; Snoussi, H.; Wang, T.; Abid, M. End-to-End Deep one-class Learning for Anomaly Detection in UAV Video Stream. *J. Imaging* 2021, 7, 90. <https://dx.doi.org/10.3390/jimaging7050090>

9. X. Yao, Y. Liu, "A new evolutionary system for evolving artificial neural networks", in IEEE trans Neural networks, May 97, Vol. 8, №3 pp: 694-713
10. I.K. Sethi, "Neural implementation of tree classifiers", in IEEE trans. systems, man and cybernetics, Vol. 25, №8, August 95, pp. 1243-1248.
11. Иванов, Д. С. Метод последовательного приближения с использованием градиентного спуска при оценке напряжений в подземных трубопроводах со сложными деформациями в перmafrostной зоне / Д. С. Иванов, З. Г. Корнилова, Г. С. Аммосов // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2023. – № 4(86). – С. 23-28. – EDN UXDRJF.
12. Carvalho, A & Rebello, J & Silva, R & Sagrilo, Luis. (2006). Reliability of the manual and automatic ultrasonic technique in the detection of pipe weld defects. *Insight*. 48. 649-654. 10.1784/insi.2006.48.11.649.
13. Морозова, С. С. Исследование фактического коэффициента запаса прочности трубопровода из стеклопластиковых труб / С. С. Морозова, Е. А. Леонович // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2023. – № 2(84). – С. 7-13. – EDN ETYWBL.
14. Barradas, I., Garza, L.E., Morales-Menendez, R., Vargas-Martinez, A. (2009). Leaks Detection in a Pipeline Using Artificial Neural Networks. In: Bayro-Corrochano, E., Eklundh, J.O. (eds) Progress in Pattern Recognition, Image Analysis, Computer Vision, and Applications. CIARP 2009. Lecture Notes in Computer Science, vol 5856. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-10268-4\\_75](https://doi.org/10.1007/978-3-642-10268-4_75)
15. Потапов, Б. В. Подход к перспективным исследованиям в области технического диагностирования нефтегазопромысловых трубопроводов из армированных полимерных труб / Б. В. Потапов, С. В. Марченко, А. Б. Потапов // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2023. – № 1(83). – С. 19-26. – EDN REZLBF.
16. Земенкова М.Ю. Системный анализ и технологический мониторинг надежности и безопасности при транспорте и хранении углеводородов. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2017. 252 с.
17. СП 284.1325800.2016 Трубопроводы промысловые для нефти и газа. Правила проектирования и производства работ
18. РД 51-4.2.-003-97 Методическое руководство по оценке степени риска аварий на магистральных нефтепроводах
19. РД 26-10-87 Оценка надежности химического и нефтяного оборудования при поверхностном разрушении

**Морозов Олег Олегович**

АО «ВНИИСТ»,  
Генеральный директор  
125319, г. Москва, 4 - я улица 8  
Марта, д. 3, стр. 1  
E-mail: info@vniist.ru

**Потапов Борис Васильевич**

АО «ВНИИСТ»,  
д.т.н., профессор,  
Ученый секретарь НТС  
125319, г. Москва, 4 - я улица 8  
Марта, д. 3, стр. 1  
E-mail: bpotapov@vniist.ru

**Шербань Павел Сергеевич**

АО «ВНИИСТ»,  
к.т.н., доцент  
Заведующий лаборатории ТСиРТ  
125319, г. Москва, 4 - я улица 8  
Марта, д. 3, стр. 1  
1E-mail: p.Shcherban@vniist.ru

---

O.O. MOROZOV, B.V. POTAPOV, P.S. SHCHERBAN

## RESEARCH ON THE CAPABILITIES OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES IN DIAGNOSING THE CONDITION OF POLYMER REINFORCED PIPELINES

**Abstract:** The article analyzes various approaches to the use of artificial intelligence technologies in processing an array of data received during the diagnosis and monitoring of the technical condition of polymer reinforced pipes. The effectiveness of the methods and the specifics of technological solutions for their application are assessed. The promising capabilities of artificial intelligence in processing incoming information are determined. The peculiarities of the organization of a neural network, its structure, and the sequence of data analysis are considered. Procedures for training a neural network to assess the technical condition of pipes are analyzed. Methods are considered to reduce the likelihood of errors of the first and second types in the process of recognizing defects and conditions of pipes. A concept for modular design of software responsible for assessing the technical condition of polymer reinforced pipelines is being developed.

**Keywords:** polymer reinforced pipes; defects; failures; artificial intelligence; neural networks; UAV; technical condition assessment.

## BIBLIOGRAPHY

1. Herrera, R.H., Christensen, P., & Elvers, A. (2019). Machine learning in pipeline inspection: applications of supervised learning in non-destructive evaluation. *CINDE Journal*, 40(5), 6-11.

2. Barradas, I., Garza, L.E., Morales-Menendez, R., Vargas-Martínez, A. (2009). Leaks Detection in a Pipeline Using Artificial Neural Networks. In: Bayro-Corrochano, E., Eklundh, JO. (eds) Progress in Pattern Recognition, Image Analysis, Computer Vision, and Applications. CIARP 2009. Lecture Notes in Computer Science, vol 5856. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-10268-4\\_75](https://doi.org/10.1007/978-3-642-10268-4_75)
3. Lemma, T.A., Muniandy, D., Ahsan, S. (2020). Automated Pipeline Diagnostics Using Image Processing and Intelligent System. In: Awang, M., Emamian, S., Yusof, F. (eds) Advances in Material Sciences and Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-8297-0\\_16](https://doi.org/10.1007/978-981-13-8297-0_16)
4. M. T. Egorovna and V. T. Nikolaevna, "Artificial intelligence in problems of leak definition from the oil pipeline," 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS), Tomsk, Russia, 2014, pp. 1-4, doi: 10.1109/MEACS.2014.6986846.
5. Monika Steidl, Michael Felderer, Rudolf Ramler, The pipeline for the continuous development of artificial intelligence models—Current state of research and practice, Journal of Systems and Software, Volume 199, 2023, 111615, ISSN 0164-1212, <https://doi.org/10.1016/j.jss.2023.111615>.
6. Alekperova S.T., Revazov A.M. Praktika primeneniya texnologij iskusstvennogo intellekta pri planirovaniu meropriyatiy po obespecheniyu bezopasnosti ob``ektov doby`chi i transporta uglevodorodov // Territoriya Neftegaz. 2022. № 1-2. S. 40-44.
7. Belostoczkij M.A., Kun`lin` L., Korolenok A.M., Korolenok V.A. Formirovanie intellektual`noj sistemy` upravleniya remontom na linejnoj chasti magistral`ny`x nefteprovodov // Nauka i texnologii truboprovodnogo transporta nefti i nefteproduktov. 2022. T. 12. № 4. S. 368-375. DOI: 10.28999/2541-9595-2022-12-4-368-375
8. Hamdi, S.; Bouindour, S.; Snoussi, H.; Wang, T.; Abid, M. End-to-End Deep one-class Learning for Anomaly Detection in UAV Video Stream. J. Imaging 2021, 7, 90. <https://dx.doi.org/10.3390/jimaging7050090>
9. X. Yao, Y. Liu, " A new evolutionary system for evolving artificial neural networks", in IEEE trans Neural networks, May 97, Vol. 8, N°3 pp: 694-713
10. I.K. Sethi, "Neural implementation of tree classifiers", in IEEE trans. systems, man and cybernetics, Vol. 25, №8, August 95, pp. 1243-1248.
11. Ivanov, D. S. Metod posledovatel`nogo priblizheniyas ispol`zovaniem gradientnogo spuska pri ocenke napryazhenij v podzemny`x truboprovodax so slozhny`mi deformaci-yami v permafrostnoj zone / D. S. Ivanov, Z. G. Kornilova, G. S. Ammosov // Trubopro-vodny`j transport: teoriya i praktika. – 2023. – № 4(86). – S. 23-28. – EDN UXDRJF.
12. Carvalho, A & Rebello, J & Silva, R & Sagrilo, Luis. (2006). Reliability of the manual and automatic ultrasonic technique in the detection of pipe weld defects. Insight. 48. 649-654. 10.1784/insi.2006.48.11.649.
13. Morozova, S. S. Issledovanie fakticheskogo koe`fficiente zapasa prochnosti truboprovoda iz stekloplastikovy`x trub / S. S. Morozova, E. A. Leonovich // Truboprovodny`j transport: teoriya i praktika. – 2023. – № 2(84). – S. 7-13. – EDN ETYWBL.
14. Barradas, I., Garza, L.E., Morales-Menendez, R., Vargas-Martínez, A. (2009). Leaks Detection in a Pipeline Using Artificial Neural Networks. In: Bayro-Corrochano, E., Eklundh, JO. (eds) Progress in Pattern Recognition, Image Analysis, Computer Vision, and Applications. CIARP 2009. Lecture Notes in Computer Science, vol 5856. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-10268-4\\_75](https://doi.org/10.1007/978-3-642-10268-4_75)
15. Potapov, B. V. Podxod k perspektivny`m issledovaniyam v oblasti texnicheskogo diagnostirovaniya neftegazopromy`slovy`x truboprovodov iz armirovanny`x polimerny`x trub / B. V. Potapov, S. V. Marchenko, A. B. Potapov // Truboprovodny`j transport: teoriya i praktika. – 2023. – № 1(83). – S. 19-26. – EDN REZLBF.
16. Zemenkova M.Yu. Sistemny`j analiz i texnologicheskij monitoring nadezhnosti i bezopasnosti pri transporte i xranenii uglevodorodov. Tyumen`: Tyumenskij industrial`ny`j universitet, 2017. 252 s.
17. SP 284.1325800.2016 Truboprovody` promy`slovy`e dlya nefti i gaza. Pravila proektirovaniya i proizvodstva rabot
18. RD 51-4.2.-003-97 Metodicheskoe rukovodstvo po ocenke stepeni riska avarij na magistral`ny`x nefteprovodax
19. RD 26-10-87 Ocenka nadezhnosti ximicheskogo i neftyanogo oborudovaniya pri poverxnostnom razrushenii

**Morozov Oleg Olegovich**

JSC VNIIST,  
General Director  
125319, Moscow, 4th street 8  
March, 3, building 1  
E-mail: [info@vniist.ru](mailto:info@vniist.ru)

**Potapov Boris Vasilievich**

JSC VNIIST,  
Doctor of Technical Sciences, Professor  
Scientific Secretary of the Scientific and  
Technical Council  
125319, Moscow, 4th street 8 March, 3,  
building 1  
E-mail: [bpotapov@vniist.ru](mailto:bpotapov@vniist.ru)

**Shcherban Pavel Sergeevich**

JSC VNIIST,  
Candidate of technical science  
Head of TSiRT laboratory  
125319, Moscow, 4th street 8 March,  
3, building 1  
E-mail: [p.Shcherban@vniist.ru](mailto:p.Shcherban@vniist.ru)

Адрес издателя:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»  
302026, Орловская область, г. Орёл, ул. Комсомольская, 95  
Тел. (4862) 75–13–18  
<http://oreluniver.ru>  
E-mail: [info@oreluniver.ru](mailto:info@oreluniver.ru)

Адрес редакции:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»  
302030, Орловская область, г. Орёл, ул. Московская, 34  
+7 (905) 169 88 99

<https://oreluniver.ru/science/journal/fippt>  
E-mail: [radsu@rambler.ru](mailto:radsu@rambler.ru)

Материалы статей печатаются в авторской редакции

Право использования произведений предоставлено авторами на основании  
п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации

Технический редактор Тюхта А.В.  
Компьютерная верстка Тюхта А.В.

Подписано в печать 39.08.2024 г.  
Дата выхода в свет 27.09.2024 г.  
Формат 70x108/16. Усл. печ. л. 12,47  
Цена свободная. Тираж 1000 экз.  
Заказ № 178

Отпечатано с готового оригинал-макета  
на полиграфической базе ОГУ имени И.С. Тургенева  
302026, Орловская область, г. Орёл, ул. Комсомольская, д. 95