

ISSN 2073-7408

# ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО - ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

5 (367) 2024

## Редколлегия

Главный редактор

Радченко С.Ю. *д-р техн. наук, проф.*

Заместители главного редактора:

Барсуков Г.В. *д-р техн. наук, проф.*

Гордон В.А. *д-р техн. наук, проф.*

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

Поляков Р.Н. *д-р техн. наук, проф.*

Шоркин В.С. *д-р физ.-мат. наук, проф.*

Члены редколлегии:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## Содержание

### Машиностроительные технологии и оборудование

Землянушинов Н.А., Землянушинова Н.Ю., Дорохов Д.О., Радченко С.Ю. Теоретическое исследование глубины наклёпа клапанных пружин из стали OTEVA 70 SC при дробемётной обработке.....	3
Ковалев В.Д., Панков В.П., Радченко С.Ю., Степанова М.В., Швецов А.А. Теплозащитные покрытия лопаток турбин авиационных ГТД с оценкой их теплопроводности и теплостойкости.....	9
Кожус О.Г., Барсуков Г.В., Журавлева Т.А., Петрухин А.В., Черепенько А.А. Повышение производительности гидроабразивного резания за счет снижения гидродинамического сопротивления сопла при введении поверхностно-активных добавок.....	22

### Машиноведение и мехатроника

Злобин С.Н., Маслов М.А., Бондаренко Д.А., Волохов С.Г. Технические решения колесно-моторных блоков с магнитными усилителями сцепления.....	29
Кушнарёв С.Л. Направления повышения эксплуатационной надежности машин и оборудования.....	38
Нгуен Тхай Ха Влияние структурных параметров на формирование полей гидродинамических давлений в радиально-упорных подшипниках жидкостного скольжения.....	44

### Приборы, биотехнические системы и технологии

Солдаткин В.М., Солдаткин В.В., Ефремова Е.С. Информационно-измерительная система воздушных сигналов летательного аппарата с интегрированным фюзеляжным приемником параметров набегающего воздушного потока.....	52
Потапова Е.В. Метод синтеза биотехнической системы интраоперационной оптической диагностики перфузионно-метаболических параметров в малоинвазивной хирургии.....	60

### Контроль, диагностика, испытания и управление качеством

Полякова М.А., Гун И.Г., Голубчик Э.М., Столяров Ф.А. Применение системного анализа технологии холодной листовой штамповки при взаимодействии предприятий-производителей автомобильных компонентов.....	71
Сидорин В.В., Халилюлина Н.Б. Модель и метод оценки результативности проекта.....	81
Рябчиков П.В. Повышение достоверности результатов контроля трубопроводов после реализации мероприятий по управлению надёжностью.....	91
Топольник В.Г. Сравнительная оценка технического уровня электрических пищеварочных котлов Abat производства АО «Чувашторгтехника».....	98
Куц В.В., Горшенина А.С. Контроль соосности шеек валов методом машинного зрения.....	111

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

Андреев А.В., Стреляная Ю.О. Моделирование процессов в реверс-инжиниринге на примере судовой холодильной установки.....	122
Гайнуллина Я.Н., Солин П.К., Калинин М.И. К вопросу повреждаемости бионертных полимеров в глубоководных аппаратах жидкостного дыхания.....	134
Годжаев З.А., Сенькевич С.Е., Малахов И.С., Уютов С.Ю. Оценка эффективности применения адаптивной системы подпрессоривания сельскохозяйственных мобильных энергетических средств.....	141
Дологлонян А.В., Матвеев В.Т., Клименко А.Г. Термодинамические характеристики гибких комбинированных микрогазотурбинных установок на базе двигателей с промподогревом для распределенной энергетики.....	151
Кандурова К.Ю., Мамошин А.В., Потапова Е.В. Возможности флуоресцентно-отражательной спектроскопии для классификации функционального состояния печени пациентов с механической желтухой.....	164
Стреляная Ю.О., Тараховский А.Ю. Цифровой инжиниринг - альтернатива импортозамещения в машиностроении.....	174
Харченко А.О., Корчевский С.В., Харченко А.А. Стендовое оборудование для исследования надежности затылованных мелкогазовых метчиков.....	181
Пахалюк В.И., Поляков А.М., Рыжков А.И. Инновационный мехатронный стенд-симулятор для испытания тотальных эндопротезов тазобедренного сустава на износ.....	193
Моисеев Д.В., Доронина Ю.В. Модель динамических требований при проектировании развивающейся сложной системы.....	200
Неменко А.В., Никитин М.М. Стабилизация движения при финишной обработке тонкостенных труб.....	206
Годжаев З.А., Шеховцов В.В., Ляшенко М.В., Потапов П.В., Искалиев А.И., Пушкарев А.А. Технические решения упругих муфт для силовых передач тяговых и транспортных машин.....	211
Рошупкин С.И., Солнцева Д.С. Роль и место 3D-сканирования в технологиях распределённого проектирования.....	225

Журнал входит в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» ВАК по следующим группам научных специальностей: 2.2.4. Приборы и методы измерения (по видам измерений) (технические науки), 2.2.5. Приборы навигации (технические науки), 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды (технические науки), 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы (технические науки), 2.2.12. Приборы, системы и изделия медицинского назначения (технические науки), 2.5.2. Машиноведение (технические науки), 2.5.3. Трение и износ в машинах (технические науки), 2.5.4. Роботы, мехатроника и робототехнические системы (технические науки), 2.5.5. Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки), 2.5.6. Технология машиностроения (технические науки), 2.5.7. Технологии и машины обработки давлением (технические науки), 2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства (технические науки).

## Editorial Committee

### Editor-in-chief

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

### Editor-in-chief Assistants:

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

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

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

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

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

### Member of editorial board:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Lavryenko 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)

Smolenzey 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/fipptt>

E-mail: [radstu@rambler.ru](mailto:radstu@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-ru](http://www.pressa-ru)  
and [www.aks.ru](http://www.aks.ru)

© Orel State University, 2024

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

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

## Contents

### Machine–building technologies and equipment

Zemlyanushnov N.A., Zemlyanushnova N.Y., Dorohov D.O., Radchenko S.Yu. Riveting depth theoretical study of valve springs made of Oteva 70 SC steel during shot blasting .....	3
Kovalev V.D., Pankov V.P., Radchenko S.Yu., Stepanova M.V., Shvetsov A.A. Thermal protective coatings of aviation GTE turbine blades with assessment of their thermal conductivity and heat resistance .....	9
Kozhus O.G., Barsukov G.V., Zhuravleva T.A., Petrukhin A.V., Cherepenko A.A. Increasing the productivity of abrasive waterjet cutting by reducing the hydrodynamic resistance of the nozzle when introducing surface-active additives .....	22

### Machine Science and Mechatronics

Zlobin S.N., Maslov M.A., Bondarenko D.A., Volokhov S.G. Technical solutions for wheel-motor units with magnetic clutch assists .....	29
Kushnarev S.L. Directions for increasing the operational reliability of machinery and equipment .....	38
Nguyen Thai Ha Effect of structural parameters on the formation of hydramic pressure field in cylindrical-conical fluid bearings .....	44

### Devices, biotechnical systems and technologies

Soldatkin V.M., Soldatkin V.V., Efremova E.S. Information and measurement system of aircraft air signals with an integrated fuselage receiver of incoming air flow parameters .....	52
Potapova E.V. Method of synthesizing a biotechnical system for intraoperative optical diagnostics of perfusion and metabolic parameters in minimally invasive surgery .....	60

### Monitoring, Diagnostics, Testing and Quality Management

Polyakova M.A., Gun I.G., Golubchik E.M., Stolyarov F.A. Interaction of manufacturers as a basis to design technological systems for the manufacturing of automotive components .....	71
Sidorin V.V., Khalilulina N.B. The model and method of evaluating the effectiveness of the project .....	81
Riabchikov P.V. Improving the reliability of control results after the implementation of reliability management measures .....	91
Topolnik V.G. Comparative assessment of the technical level of Abat electric foods cookers produced by JSC «Chuvashortekhnika» .....	98
Kuts V.V., Gorshenina A.S. Control of alignment of shaft journals by the method of machine vision .....	111

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

Andreev A.V., Strelyanaya Yu.O. Modeling of processes in reverse engineering using the example of a marine refrigeration unit .....	122
Gaynullina Ya.N., Sopin P.K., Kalinin M.I. On the issue of damage to bioinert polymers in deep-sea liquid breathing apparatus .....	134
Godzhaev Z.A., Senkevich S.E., Malakhov I.S., Uyutov S.Y. Evaluation of the efficiency of application of adaptive system of agricultural mobile power vehicles suspension .....	141
Dologlonyan A.V., Matveenko V.T., Klimenko A.G. Thermodynamic characteristics of flexible combined microgas turbine plants based on interheated engines for distributed energy .....	151
Kandurova K.Y., Mamoshin A.V., Potapova E.V. Possibilities of fluorescence and reflectance spectroscopy for classification of the functional state of the liver in patients with obstructive jaundice .....	164
Strelyanaya Yu.O., Tarakhovskiy A.Yu. Digital engineering an alternative to import substitution in mechanical engineering .....	174
Kharchenko A.O., Korchevski S.V., Kharchenko A.A. Bench equipment for studying the reliability of relied small-sized taps .....	181
Pakhaliuk V.I., Poliakov A.M., Ryzhkov A.I. Innovative mechatronic simulator bench for wear testing of total hip joint endoprostheses .....	193
Moiseev D.V., Doronina Yu.V. A model of dynamic requirements in the design of an developing complex system .....	200
Nemenko A.V., Nikitin M.M. Movement stabilization during thin-walled tubes finishing .....	206
Godzhaev Z.A., Shekhovtsov V.V., Liashenko M.V., Potapov P.V., Iskaliev A.I., Pushkarev A.A. Technical solutions of elastic couplings for drivetrains of transport and traction vehicles .....	211
Roshchupkin S.I., Solntseva D.S. The role and place of 3D scanning in distributed design technologies .....	225

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

УДК 621.73

DOI: 10.33979/2073-7408-2024-367-5-3-8

Н.А. ЗЕМЛЯНУШНОВ, Н.Ю. ЗЕМЛЯНУШНОВА, Д.О. ДОРОХОВ, С.Ю. РАДЧЕНКО

## **ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГЛУБИНЫ НАКЛЁПА КЛАПАННЫХ ПРУЖИН ИЗ СТАЛИ OTEVA 70 SC ПРИ ДРОБЕМЁТНОЙ ОБРАБОТКЕ**

**Аннотация.** Исследован метод определения глубины наклепанного слоя при дробемётной обработке пружин, показан его недостаток, заключающийся в необходимости проведения предварительных экспериментальных исследований с использованием контрольных пластинок. С целью устранения указанного недостатка рассмотрен теоретический способ определения глубины упрочненного слоя на примере пружин из стали Oteva 70 SC. Установлены зависимости глубины упрочненного слоя при дробемётной обработке от предела текучести и среднего диаметра сечения пружинной проволоки Oteva 70 SC.

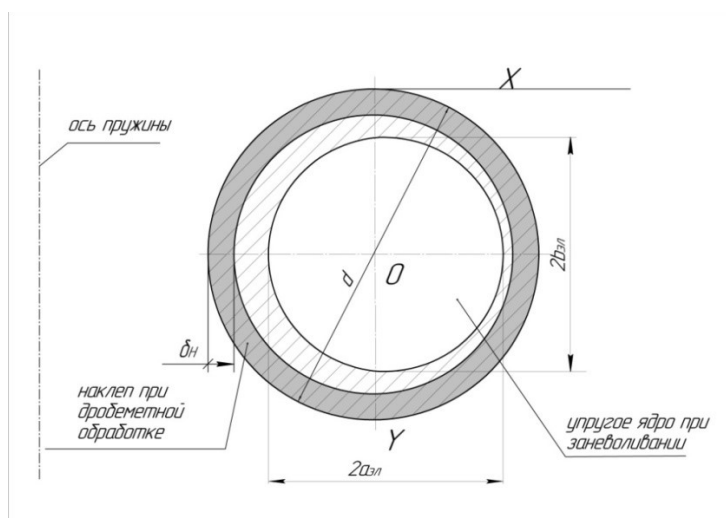
**Ключевые слова:** дробемётная обработка, упрочнение, клапанные пружины, глубина наклепанного слоя.

### **Введение**

При изготовлении целого ряда изделий машиностроения применяются методы обработки металлов давлением [1, 2, 8-12]. Так, при производстве винтовых цилиндрических пружин сжатия используются холодная осадка, термоосадка, заневоливание, контактное заневоливание и другие [10, 14]. Одним из методов упрочнения пружин является дробемётная обработка, получившая широкое применение ввиду сложности геометрии и профиля пружин [15].

Дробемётная обработка является технологической операцией упрочнения пружин, применяемая как при их изготовлении, так и при восстановлении [4, 5, 6, 15]. Принцип дробемётной обработки пружин заключается в воздействии шариков стальной литой дробы на поверхность пружины.

Основной задачей, решаемой в технологических процессах при применении дробемётной обработки, является уменьшение концентраторов напряжений в поверхностном слое металла пружин с целью минимизации усталостных разрушений в процессе эксплуатации. В процессе соударений стальной литой дробы о поверхность пружины в ней формируется пластически деформированная зона, определение глубины которой (рисунок 1) рассмотрено в работах [3, 10, 13].



**Рисунок 1 - Сечение витка пружины при дробемётной обработке и при заневоливании:**

$\delta_n$  - глубина наклепа при дробемётной обработке;  $a_{эл}$ ,  $b_{эл}$  - длина соответственно большей и меньшей полуоси эллипса [3]



Известен метод [13] определения глубины наклепанного слоя, разработанный Савериным М.М., при котором интенсивность наклепа проверяют по величине прогиба контрольных пластинок после дробемётной обработки (рисунок 2). Контрольные пластины изготавливаются из углеродистой стали и обладают твердостью 44-50 HRC. Пластины закрепляют винтами на специальной подставке и подвергают наклепу. В результате наклепа пластины после освобождения от винтов изгибаются в сторону обработанной дробью поверхности. По стреле прогиба пластинок судят о степени наклепа. Возможны два варианта реализации метода:

- 1) односторонняя обработка двух пластинок разной толщины, находящихся в свободном состоянии;
- 2) последовательная обработка двух сторон одной пластинки.

В случае одностороннего наклепа двух пластинок [13] глубина упрочненного слоя  $\delta_H$  определяется по формуле

$$\delta_H = \frac{\alpha \cdot \beta^2 - 1}{3 \cdot (1 - \beta)} \cdot h_1, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – отношение стрелы прогиба первой пластинки к стреле прогиба второй;  
 $\beta$  – отношение толщины первой пластинки к толщине второй;  
 $h_1$  – толщина пластинки.

Определение  $\delta_H$  с помощью двухстороннего наклепа одной пластинки производится по формуле [13]:

$$\delta_H = \frac{f \cdot h}{2 \cdot f_1}, \quad (2)$$

где  $f$  и  $f_1$  – величины прогиба пластины после обработки ее первой и второй стороны соответственно;  
 $h$  – толщина пластинки.

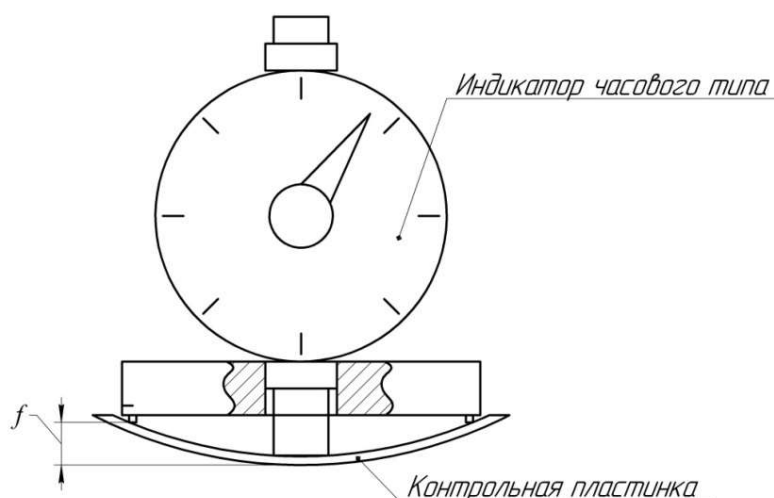


Рисунок 2 – Схема замера стрелы прогиба контрольной пластинки [10]

Сложность описанного метода заключается в необходимости проведения экспериментальных исследований, что требует дополнительных технических ресурсов и материальных и временных затрат.

Целью данной статьи является теоретическое исследование глубины налёпа поверхностного слоя клапанных пружин, изготовленных из пружинной проволоки Oteva 70 SC, при дробемётной обработке.

#### Основная часть

Рассмотрим способ [7] определения глубины упрочненного слоя Колмогорова Г.Л. и Высотина А.С.

Примем условие пластичности [7]:

$$\frac{3 \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot \delta_H^2} = \sigma_T, \quad (3)$$

где  $P$  – действующее на обрабатываемую поверхность усилие;  
 $\sigma_T$  – предел текучести материала обрабатываемой поверхности.  
 Тогда глубина упрочненного слоя [7]:

$$\delta_H = \sqrt{\frac{2 \cdot P}{3 \cdot \pi \cdot \sigma_T}}. \quad (4)$$

Действующее на обрабатываемую поверхность усилие  $P$  зависит от давления струи подаваемого дробемётной установкой воздуха  $p_0$ , радиуса дроби  $R$  и угла между потоком дроби и обрабатываемой поверхностью  $\gamma$  [7]:

$$P = p_0 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \sin \gamma. \quad (5)$$

Подставив выражение (5) в формулу (4), получим [7]:

$$\delta_H = R \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot p_0 \cdot \sin \gamma}{3 \cdot \sigma_T}}. \quad (6)$$

Одним из перспективных материалов для изготовления клапанных пружин двигателей автомобилей является закаленная в масле пружинная проволока Oteva 70 SC (стандарт на продукцию EN 10270-2), механические свойства которой меняются в зависимости от номинального диаметра сечения выпускаемой партии проволоки и представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Механические свойства пружинной проволоки Oteva 70 SC

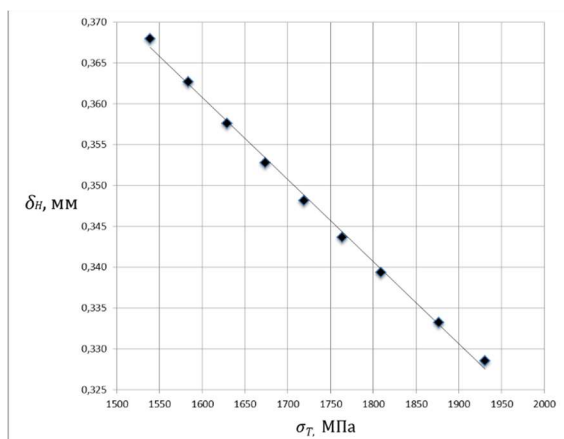
Номинальный диаметр сечения проволоки, мм	Предельные отклонения, мм	Предел прочности на растяжение, Н/мм <sup>2</sup>	Предел текучести на растяжение, Н/мм <sup>2</sup>
0,50 - 0,80	±0,010	2080 - 2210	1872-1989
0,81 - 1,30	±0,015	2080 - 2210	1872-1989
1,31 - 1,40	±0,015	2080 - 2210	1872-1989
1,41 - 1,60	±0,020	2080 - 2210	1872-1989
1,61 - 2,00	±0,020	2010 - 2160	1809-1944
2,01 - 2,50	±0,020	1960 - 2060	1764-1854
2,51 - 3,00	±0,020	1910 - 2010	1719-1809
3,01 - 3,20	±0,020	1910 - 2010	1719-1809
3,21 - 3,50	±0,025	1910 - 2010	1719-1809
3,51 - 4,50	±0,025	1860 - 1960	1674-1764
4,51 - 5,00	±0,025	1810 - 1910	1629-1719
5,01 - 5,60	±0,030	1810 - 1910	1629-1719
5,61 - 6,00	±0,035	1760 - 1860	1584-1674
6,01 - 6,50	±0,035	1760 - 1860	1584-1674
6,51 - 7,00	±0,040	1710 - 1810	1539-1629
7,01 - 8,00	±0,045	1710 - 1810	1539-1629
8,01 - 9,00	±0,045	1660 - 1760	1494-1584
9,01 - 10,00	±0,050	1660 - 1760	1494-1584

Дробемётная установка 6GT8,5 – 10R ф. «Carlo Banfi» (Италия) обеспечивает давление потока воздуха  $p_0 = 0,5$  МПа. Радиус дроби типа ДСЛ-0,5  $R = 0,25$  мм. Поток дроби разгоняется сжатым воздухом, подаваемым компрессором, до скорости 65 м/с [10]. В зависимости от технологической цели клапанные пружины подвергаются дробемётной обработке с разной по времени продолжительностью. После шлифовки для снятия заусенцев дробемётная обработка выполняется в течение 3 минут и не меняет в значительной степени механические свойства обрабатываемой поверхности. С целью изменения геометрии и упрочнения пружины посредством создания в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений дробемётная обработка выполняется в течение 10 минут. Поскольку при таком виде дробемётной обработки пружины в свободном состоянии (не сжатом) внутренние и наружные волокна наклёпываются до насыщения, примем  $\gamma = 90^\circ$ .

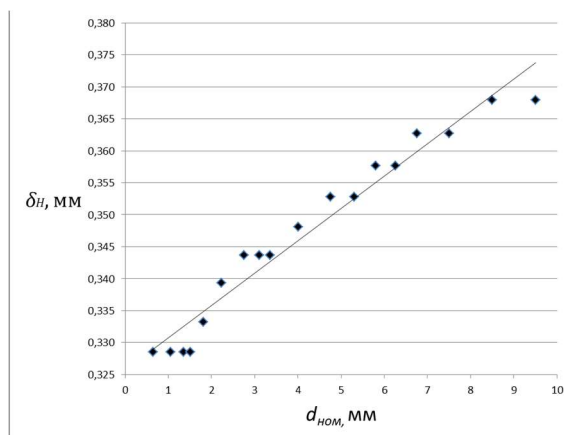
На рисунке 3 приведена расчетная зависимость глубины упрочненного слоя  $\delta_H$  при дробемётной обработке пружинной проволоки Oteva 70 SC от предела текучести полученная по формуле (6).

Определено уравнение (7), описывающее полученную зависимость с достоверностью аппроксимации  $R^2 = 0,9976$ :

$$\delta_H = -0,0001 \cdot \sigma_T + 0,5216. \quad (7)$$



**Рисунок 3 – Зависимость глубины упрочнения пружинной проволоки Oteva 70 SC от предела текучести**



**Рисунок 4 – Зависимость глубины упрочнения пружинной проволоки Oteva 70 SC от среднего номинального диаметра**

На рисунке 4 приведена расчетная зависимость глубины упрочненного слоя  $\delta_H$  при дробемётной обработке от среднего номинального диаметра  $d_{ном}$  сечения пружинной проволоки Oteva 70 SC.

Определено уравнение (8), описывающее полученную зависимость с достоверностью аппроксимации  $R^2 = 0,9574$ :

$$\delta_H = 0,0051 \cdot d_{ном} + 0,3257. \quad (8)$$

Из проведенного исследования видно, что увеличение номинального диаметра сечения пружинной проволоки Oteva 70 SC приводит к увеличению глубины упрочненного слоя вследствие уменьшения предела текучести.

### Заключение

В работе исследовано влияние диаметра сечения проволоки и предела текучести на глубину упрочненного слоя пружины при дробемётной обработке на примере пружинной стали Oteva 70 SC. Показано преимущество рассмотренного способа определения упрочненного слоя, заключающего в отсутствии необходимости проведения предварительных экспериментальных исследований с использованием контрольных пластинок.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гладков, Ю. А. Моделирование прессования алюминиевых профилей в новой версии программы Qform Extrusion VX: совместная деформационная задача / Ю. А. Гладков, С. С. Каневский // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2016. – № 11. – С. 41-48.
2. Градиентное управляемое упрочнение пружин сжатия / Н. А. Землянушнов, Д. О. Дорохов, С. Ю. Радченко, Н. Ю. Землянушнова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2023. – № 2(358). – С. 20-26.
3. Землянушнов, Н. А. К теоретическому обоснованию восстановления автомобильных пружин из упрочненной проволоки / Н. А. Землянушнов, Н. Ю. Землянушнова // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2018. – № 5. – С. 68-79.
4. Землянушнов, Н. А. Совершенствование способа восстановления автомобильных пружин / Н. А. Землянушнов, Н. Ю. Землянушнова // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2020. – № 2. – С. 100-106.
5. Землянушнов, Н. А. Теоретическое исследование влияния дробемётной обработки на изменение геометрических параметров пружин при контактом заневоливании / Н. А. Землянушнов, Н. Ю. Землянушнова, Д. О. Дорохов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2022. – № 6(356). – С. 38-47.
6. К оценке влияния восстановления упругости клапанных пружин на эксплуатационные показатели автомобильных двигателей / Н. А. Землянушнов, С. Ю. Радченко, Д. О. Дорохов, Н. Ю. Землянушнова // Мир транспорта и технологических машин. – 2023. – № 3-4(82). – С. 10-17.

7. Колмогоров, Г. Л. Механизм наноструктурирования поверхности деталей машиностроения при дробеструйной обработке / Г. Л. Колмогоров, А. С. Высотин // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2020. – Т. 16, № 2. – С. 146-151.
8. Кухарь, В. Д. Оценка напряженно-деформированного состояния при изготовлении оболочек с наружными ребрами / В. Д. Кухарь, С. С. Яковлев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 2. – С. 602-604.
9. Лавриненко, В. Ю. Разработка конструкции установки электроконтактного нагрева заготовок для штамповки сложнопрофильных деталей на холодновысадочных автоматах / В. Ю. Лавриненко, Ю. А. Лавриненко // Электрометаллургия. – 2023. – № 12. – С. 8-14.
10. Лавриненко, Ю. А. Изготовление высоконагруженных пружин сжатия. М.: Инновационное машиностроение, 2017. – 224 с.
11. Ларин, С. Н. Новый способ изготовления цилиндрических корпусных изделий с утолщенной краевой частью / С. Н. Ларин, А. А. Пасынков, В. И. Трегубов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2023. – Т. 21, № 5. – С. 209-212.
12. Мазур, И. П. Технология и производство листового проката. Взгляд на устремления и тенденции / И. П. Мазур, Е. Б. Бобков, В. Н. Соловьев // Черные металлы. – 2021. – № 10. – С. 4-12.
13. Остроумов, В. П. Повышение динамической прочности пружин / В. П. Остроумов, В. А. Карпунин. — Москва: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1961. — 111 с.
14. Совершенствование устройства для упрочнения винтовых цилиндрических пружин методом комплексного локального нагружения / Н. А. Землянушнов, Д. О. Дорохов, С. Ю. Радченко, Н. Ю. Землянушнова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2023. – № 3(359). – С. 33-43.
15. Lavrinenko, V. Yu. Development of mathematical model of hardening of high loaded compression springs by shot blasting treatment / V. Yu. Lavrinenko, Yu. A. Lavrinenko // Strengthening Technologies and Coatings. – 2018. – Vol. 14, No. 11(167). – P. 508-511.

**Землянушнов Никита Андреевич**

ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», г. Ставрополь  
Кандидат технических наук, старший преподаватель  
кафедры технологии машиностроения и  
техносферной безопасности  
355017, Россия, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1  
Тел.: +7 (8652) 94-41-40  
E-mail: nikita3535@mail.ru

**Дорохов Даниил Олегович**

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева», г. Орёл  
Доктор технических наук, доцент, профессор  
кафедры машиностроения  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел.: +7(906)6650002  
E-mail: ddostu@mail.ru

**Землянушнова Надежда Юрьевна**

ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», г. Ставрополь  
Кандидат технических наук, доцент, заведующий  
кафедрой технологии машиностроения и  
техносферной безопасности  
355017, Россия, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1  
Тел.: +7 (8652) 94-41-40  
E-mail: zemlyanushnova@rambler.ru

**Радченко Сергей Юрьевич**

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

N.A. ZEMLYANUSHNOV, N.Y. ZEMLYANUSHNOVA, D.O. DOROHOV, S.Y. RADCHENKO

## RIVETING DEPTH THEORETICAL STUDY OF VALVE SPRINGS MADE OF OTEVA 70 SC STEEL DURING SHOT BLASTING

**Abstract.** *A method for determining the riveted layer depth during shot blasting of springs is investigated, its disadvantage is shown, which consists in the need for preliminary experimental studies using control plates. In order to eliminate this drawback, a theoretical method for determining the hardened layer depth is considered using the example of Oteva 70 SC steel springs. The dependences of the hardened layer depth during shot blasting on the yield strength and the average cross-section diameter of the Oteva 70 SC spring wire have been established.*

**Keywords:** *shot blasting, hardening, valve springs, spring wire.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Gladkov, Yu. A. Modeling of aluminum profile pressing in the new version of the Qform VX component and extrusion program: a joint deformation problem / Yu. A. Gladkov, S. S. Kanevsky // Forging and stamping production. Processing of materials by pressure. – 2016. – No. 11. – pp. 41-48.

2. Gradient controlled hardening of compression springs / N. A. Zemlyanushnov, D. O. Dorokhov, S. Y. Radchenko, N. Y. Zemlyanushnova // *Fundamental and applied problems of engineering and technology*. – 2023. – No. 2(358). – pp. 20-26.
3. Zemlyanushnov, N. A. On the theoretical justification of the restoration of automobile springs from hardened wire / N. A. Zemlyanushnov, N. Y. Zemlyanushnova // *Intelligence. Innovation. Investment*. – 2018. – No. 5. – pp. 68-79.
4. Zemlyanushnov, N. A. Improving the method of restoring automobile springs / N. A. Zemlyanushnov, N. Y. Zemlyanushnova // *Intelligence. Innovation. Investment*. – 2020. – No. 2. – pp. 100-106.
5. Zemlyanushnov, N. A. Theoretical study of the effect of shot blasting on the change in geometric parameters of springs during contact drilling / N. A. Zemlyanushnov, N. Y. Zemlyanushnova, D. O. Dorokhov // *Fundamental and applied problems of engineering and technology*. – 2022. – No. 6(356). – pp. 38-47.
6. To assess the effect of restoring the elasticity of valve springs on the performance of automobile engines / N. A. Zemlyanushnov, S. Y. Radchenko, D. O. Dorokhov, N. Y. Zemlyanushnova // *The world of transport and technological machines*. – 2023. – No. 3-4(82). – Pp. 10-17.
7. Kolmogorov, G. L. The mechanism of nanostructuring the surface of machine-building parts during shot blasting / G. L. Kolmogorov, A. S. Vysotin // *Construction mechanics of engineering structures and structures*. – 2020. – Vol. 16, No. 2. – pp. 146-151.
8. Kukhar, V. D. Assessment of the stress-strain state in the manufacture of shells with external ribs / V. D. Kukhar, S. S. Yakovlev // *Izvestiya Tula State University. Technical sciences*. – 2023. – No. 2. – Pp. 602-604.
9. Lavrinenko, V. Yu. Development of the design of the installation of electric contact heating of blanks for stamping complex-profile parts on cold-shrink machines / V. Yu. Lavrinenko, Yu. A. Lavrinenko // *Electrometallurgy*. – 2023. – No. 12. – pp. 8-14.
10. Lavrinenko, Yu. A. *Manufacture of high-loaded compression springs. M.: Innovative mechanical engineering*, 2017. – 224 p.
11. Larin, S. N. A new method of manufacturing cylindrical body products with a thickened edge part / S. N. Larin, A. A. Pasyukov, V. I. Tregubov // *Procurement production in mechanical engineering*. – 2023. – Vol. 21, No. 5. – pp. 209-212.
12. Mazur, I. P. Technology and production of sheet metal. A look at aspirations and trends / I. P. Mazur, E. B. Bobkov, V. N. Solovyov // *Ferrous metals*. – 2021. – No. 10. – pp. 4-12.
13. Ostroumov, V. P. Increasing the dynamic strength of springs / V. P. Ostroumov, V. A. Karpunin. — Moscow: State Scientific and Technical Publishing House of Machine-building Literature, 1961. — 111 p.
14. Improving the device for strengthening helical cylindrical springs by the method of complex local loading / N. A. Zemlyanushnov, D. O. Dorokhov, S. Y. Radchenko, N. Y. Zemlyanushnova // *Fundamental and applied problems of engineering and technology*. – 2023. – No. 3(359). – Pp. 33-43.
15. Lavrinenko, V. Yu. Development of a mathematical model of hardening of highly loaded pressed blanks by shot blasting / V. Yu. Lavrinenko, Yu. A. Lavrinenko // *Hardening technologies and coatings*. – 2018. – Volume 14, No. 11(167). – pp. 508-511.

**Zemlyanushnov Nikita Andreevich**

North-Caucasus Federal University,  
Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer at the  
Department of Mechanical Engineering Technology and  
Technosphere Safety  
355017, Russia, Stavropol, Pushkin str., 1  
Phone number: +7 (8652) 94-41-40  
E-mail: nikita3535@mail.ru

**Dorokhov Daniil Olegovich**

Orel State University named after I.S. Turgenev  
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,  
Professor of the Department of Mechanical Engineering  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
Phone number: +7(906)6650002  
E-mail: ddostu@mail.ru

**Zemlyanushnova Nadezhda Yurievna**

North-Caucasus Federal University,  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Head of the Department of Mechanical Engineering  
Technology and Technosphere Safety  
355017, Russia, Stavropol, Pushkin str., 1  
Phone number: +7 (8652) 94-41-40  
E-mail: zemlyanushnova@rambler.ru

**Radchenko Sergey Yuryevich**

Orel State University named after I.S. Turgenev  
Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-rector for  
Scientific and Technological Activities and Certification  
of Scientific Personnel  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
Phone number: +7 (4862) 47-50-71  
E-mail: radsu@rambler.ru

© Н.А. Землянушов, Н.Ю. Землянушнова, Д.О. Дорохов, С.Ю. Радченко, 2024

В.Д. КОВАЛЕВ, В.П. ПАНКОВ, С.Ю. РАДЧЕНКО, М.В. СТЕПАНОВА, А.А. ШВЕЦОВ

## ТЕПЛОЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ ЛОПАТОК ТУРБИН АВИАЦИОННЫХ ГТД С ОЦЕНКОЙ ИХ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ТЕПЛОСТОЙКОСТИ

**Аннотация.** Разработано теплозащитное покрытие для лопаток турбин ГТД, состоящее из слоев с различными физическими, тепловыми и механическими свойствами. Рассмотрена задача теории теплопроводности в многослойной конструкции с оценкой ее долговечности.

**Ключевые слова:** покрытие, структура, сплав, термобарьерный слой, теплопроводность, температура, теплота фазовых превращений.

### Введение

Для повышения жаростойкости покрытий лопаток турбин повышают запас алюминия в покрытиях, напыляют слои с высоким содержанием алюминия (ВСДП16), однослойную или многослойную керамику на основе  $ZrO_2 - 8Y_2O_3$  [1].

Применение теплозащитных покрытий (ТЗП) позволяет существенно понизить термические напряжения на охлаждаемых лопатках, увеличить их долговечность, повысить температуру газа перед турбиной [2].

Разработанное ТЗП, нанесенное на лопатку турбины ГТД, состоит из слоев, каждый из которых имеет заметно отличающиеся физические, тепловые, и механические свойства, создавая по существу комплексную структуру покрытия (рисунок 1) [3].

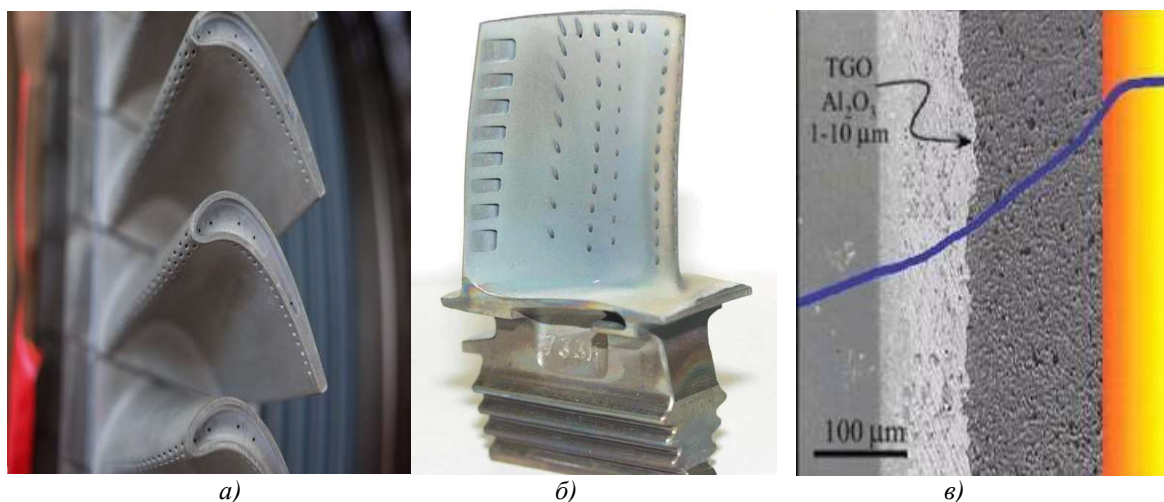


Рисунок 1- а), б) -лопатка турбины; в) - микроструктура комплексного защитного покрытия

### Характеристика сплавов и материалов покрытия

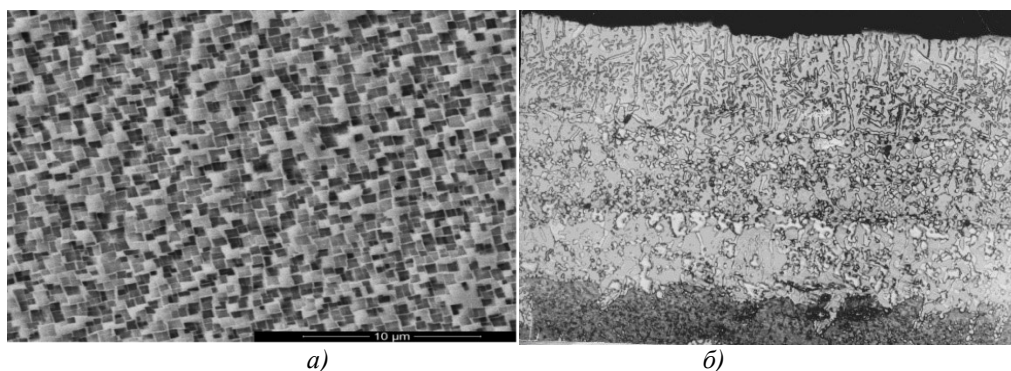
Пять слоев в современной системе ТЗП созданы из различных материалов со специфическими свойствами и функциями:

- основной сплав (непосредственно материал лопатки) (рисунок 2, а);
- термобарьерный слой (рисунок 2, б);
- связующее покрытие (рисунок 2, б);
- термически выращенный оксид (ТГО) (рисунок 3, а);
- керамическое поверхностное покрытие (рисунок 3, б).

Основной сплав - жаропрочный никелевый сплав. Материал лопатки охлаждается воздухом изнутри или через внутренние полые каналы, таким образом, устанавливая температурный градиент поперек стенки изделия (рисунок 4)[3,4].

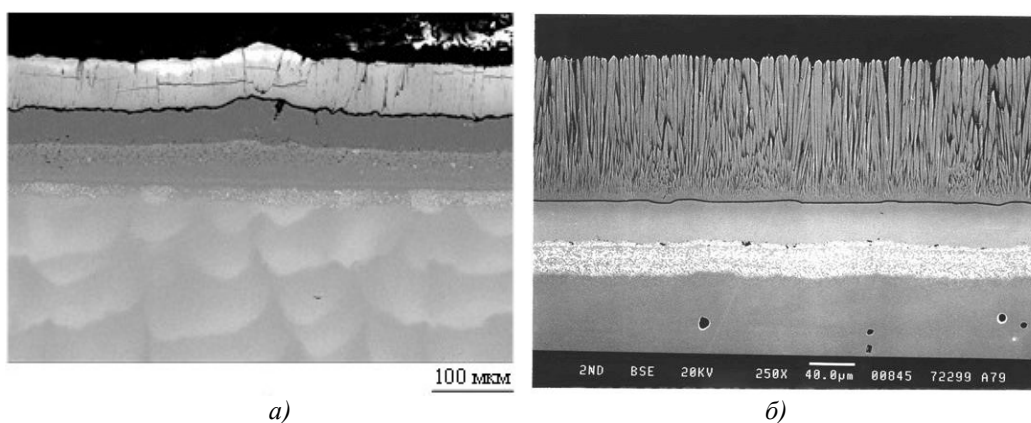
Применение высокотемпературной гомогенизирующей термической обработки позволяет сформировать равномерную микроструктуру материала турбинных лопаток, обеспечивающую их длительную работоспособность.



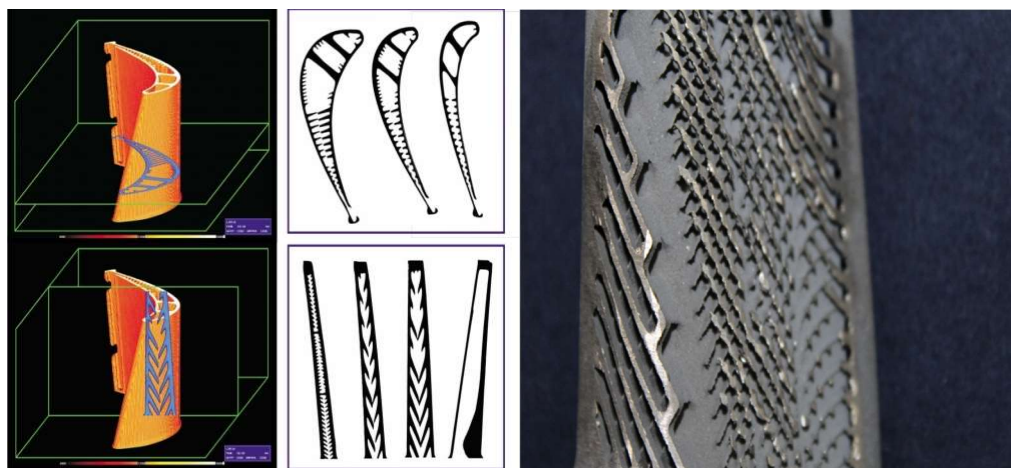


**Рисунок 2 – Вид  $\gamma$ :**

*а)-фазы никелевого сплава после термической обработки; б) - термобарьерный слой (x 500)*



**Рисунок 3 – а) термически выращенный оксид (TGO); б) - керамическое поверхностное покрытие**



**Рисунок 4 - Охлаждаемые каналы лопатки**

Термобарьерный слой - слой из тугоплавких металлов, для снижения диффузионного обмена между покрытием и сплавом в комбинированном покрытии толщиной 20-30 мкм.

Связующее покрытие — устойчивый против окисления металлический слой, NiCrAl толщиной 75–80 мкм. Покрытие получено путем хромоалитирования в вакууме и после термообработки имеет структуру –  $\beta + \gamma'$  - фаза [4].

При пиковых эксплуатационных условиях температура связующего покрытия в газотурбинных двигателях обычно превышает 700°C, приводя к окислению связующего покрытия и неизбежному формированию третьего слоя — термически выращенного оксида (TGO; толщина 5–15 мкм) между связующим покрытием и керамическим поверхностным покрытием. Кроме того, даже если поверхностное покрытие было полностью плотным, чрезвычайно высокая диффузионная способность кислорода в керамическом поверхностном покрытии на базе  $ZrO_2$  делает его «кислородопрозрачным» (рисунок 3, б).

Керамическое поверхностное покрытие — это слой, обеспечивающий теплоизоляцию, состоит из  $ZrO_2$ , стабилизированного  $Y_2O_3$ .  $ZrO_2$ - $Y_2O_3$  (YSZ) обладает комплексом свойств, которые делают этот материал наилучшим выбором для поверхностного покрытия. Диоксид циркония, благодаря меньшему модулю Юнга и большему температурному коэффициенту линейного расширения (ТКЛР), хорошо совместим с жаропрочными сплавами. Он имеет один из самых низких из всех керамик коэффициентов теплопроводности при повышенной температуре из-за высокой концентрации точечных дефектов (вакансии кислорода и замещенные атомы растворенного вещества).

С учетом эксплуатационных требований выбирается материал ТЗП, определяются необходимые показатели его качества и толщина слоя.

#### Оценка долговечности теплозащитного покрытия

Оценка долговечности ТЗП рассматривается как решение задачи теплопроводности в многослойной конструкции: основной сплав - термобарьерный слой - связующее покрытие - термически выращенный оксид - керамическое поверхностное покрытие, каждый слой которого ограничен двумя нестационарно подвижными границами фазовых превращений (рисунок 5).

Допущения, принятые при расчетах, приведены в работе [5].

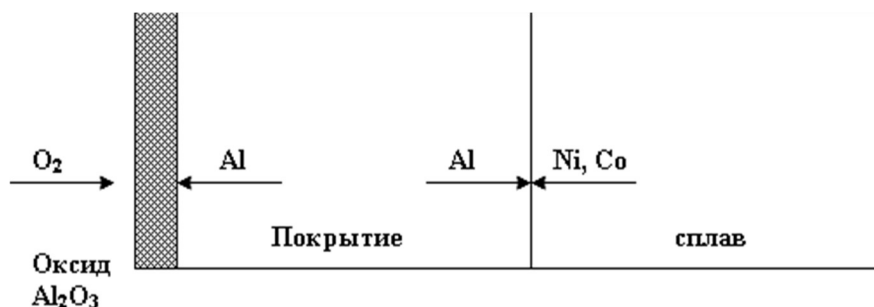


Рисунок 5 - Схема исчерпания защитных свойств покрытия

Согласно первому закону Фика, количество вещества  $J$ , продиффундировавшего через заданное сечение в единицу времени, при условии, что ось  $x$  параллельна градиенту концентрации, пропорционально градиенту концентрации,  $dc/dx$  и площади сечения  $S$ :

$$J = -DS \frac{dc}{dx},$$

Для  $S=1$

$$J = -D \frac{dc}{dx} \text{ - первый закон Фика,}$$

где  $D$  - коэффициент диффузии,  $см^2/с$ .

Для практических расчетов используют второй закон Фика, который описывает изменение концентрации диффундирующего вещества со временем.

$$\frac{dc}{dt} = D \frac{d^2c}{dx^2},$$

Для определения коэффициента диффузии для двойных сплавов пользуются методом Матано, по которому коэффициент диффузии  $D$  вычисляется для любой концентрации  $c = c_x$  по формуле:

$$D(c_x) = -\frac{1}{2t} \left( \frac{dx}{dc} \right)_{c_x} \int_0^{c_x} xdc,$$

Расстояние  $x$  отсчитывается от площади Матано, для которой  $\int_0^1 xdc = 0$ .

Результаты расчетов коэффициентов диффузии [5] приведены в таблицах 1, 2.



Таблица 1 - Коэффициенты диффузии в системе никель – алюминий

Температура, °C	Общий коэффициент диффузии $D$	$D$ , см <sup>2</sup> /с	
		по Вагнеру	по Больцману-Матано - Хойману
660	$D_{Ni2Al3}$	$6,5 \cdot 10^{-9}$	$7,1 \cdot 10^{-9}$
660	$D_{NiAl}$	$2,5 \cdot 10^{-10}$	$3,6 \cdot 10^{-10}$
1100	$D_{Ni3Al}$	$3,9 \cdot 10^{-12}$	$3,0 \cdot 10^{-12}$
1100	$D_{Ni}$	-	$8,5 \cdot 10^{-12}$

Таблица 2 - Величины энергии активации диффузии в фазах системы никель – алюминий

Фаза	Природа диффузионного процесса	$Q$ , ккал/моль
$Ni_2Al_3$	Диффузия алюминия в $Ni_2Al_3$	47
$NiAl$	Диффузия никеля в $NiAl$	41
$Ni_3Al$	Диффузия никеля в $Ni_3Al$	12

Для описания процесса диффузии в трехкомпонентной системе с переменными концентрациями на поверхности необходимо получить решение системы дифференциальных уравнений с соответствующими начальными и граничными условиями.

$$\frac{\partial C_1}{\partial t} = D_{11} \frac{\partial^2 C_1}{\partial x^2} + D_{12} \frac{\partial^2 C_2}{\partial x_2}$$

$$\frac{\partial C_2}{\partial t} = D_{21} \frac{\partial^2 C_1}{\partial x^2} + D_{22} \frac{\partial^2 C_2}{\partial x_2}$$

В качестве граничных условий задач такого типа наиболее часто берут уравнение баланса массы на границе раздела активная атмосфера-образец (граничное условие третьего рода). Начальные и граничные условия запишутся тогда в следующем виде:

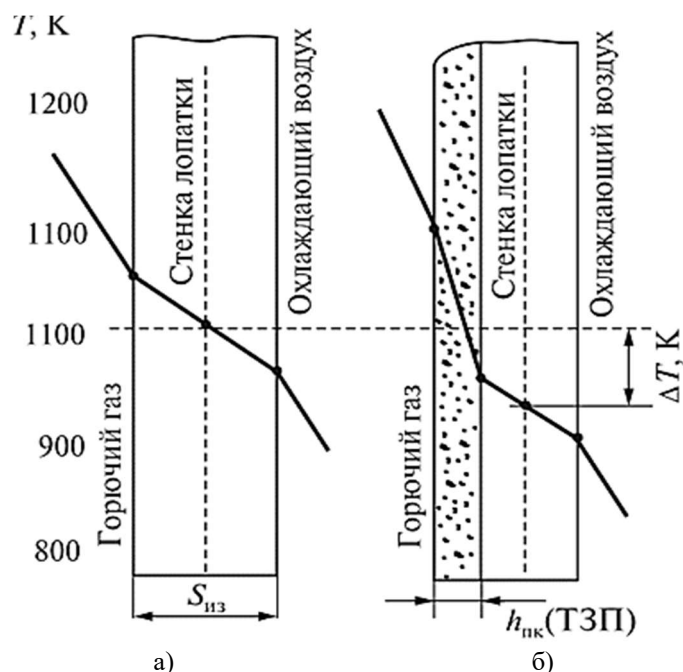


Рисунок 6 - Схема теплообмена на лопатке ГТД: а) без покрытия; б) с теплозащитным покрытием

$$C_1(x, 0) = C_1^0, \quad C_1(\infty, \tau) = C_1^0;$$

$$C_2(x, 0) = C_2^0, \quad C_2(\infty, \tau) = C_2^0;$$

$$D_{11} \frac{\partial C_1}{\partial x} \Big|_{x=0} + D_{12} \frac{\partial C_2}{\partial x} \Big|_{x=0} + k_1 [C_1^1 - C_1(0, t)] = 0$$

$$D_{22} \frac{\partial C_1}{\partial x} \Big|_{x=0} + D_{22} \frac{\partial C_2}{\partial x} \Big|_{x=0} + k_2 [C_2^1 - C_2(0, t)] = 0$$

С учетом эксплуатационных требований выбирается материал ТЗП, определяются необходимые показатели его качества и толщина слоя (рисунок 6).

### Решение задачи теплопроводности в многослойной конструкции

При циклическом нагреве - охлаждении возникает значительное число подвижных границ, анализ поведения которых необходимо учитывать, решая задачу теплопроводности в многослойной конструкции теплозащитного покрытия [6].

Номером 1 обозначим слой исходной фазы, ограниченный подвижной границей  $x_1^*(t)$ , наружный слой, примыкающий к границе  $wl$ , ограничен снаружи неподвижной границей с температурой  $T_{w1}$ , а изнутри - подвижной границей  $x_{n-1}^*(t)$ .

$$\frac{\partial^2 T_n}{\partial x^2} - \frac{1}{a_n} \frac{\partial T_n}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$0 < x < x_{n-1}^*(t), t > 0.$$

$$\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} - \frac{1}{a_s} \frac{\partial T_s}{\partial t} = 0; \quad x_s^*(t) < x < x_{n-1}^*(t), t > 0, \quad s = 2, \dots, n-1 \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} - \frac{1}{a_1} \frac{\partial T_1}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

где  $x_1^*(t) < x < \infty, t > 0$

$$-\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \Big|_{x=x_s^*(t)-0} + \lambda_{s-1} \frac{\partial T_{s-1}}{\partial x} \Big|_{x=x_{s-1}^*(t)+0} = Q_{s-1}^* \rho_{s-1} x_{s-1}^*(t), \quad (4)$$

где  $x = x_{s-1}^*(t), t > 0, s = 2, \dots, n;$

$$T_s \Big|_{x=x_s^*(t)-0} T_{s-1} \Big|_{x=x_{s-1}^*(t)+0} = T_{s-1}^*, x = x_{s-1}^*(t), \quad (5)$$

где  $x = x_{s-1}^*(t), t > 0, s = 2, \dots, n;$

$$T(0, t) = T_{w1}, \quad x = 0, \quad t > 0; \quad (6)$$

$$T(\infty, t) = T_0, \quad x = \infty, \quad t \geq 0 \quad (7)$$

$$T(0, t) = T_0, \quad x \in (0, \infty); \quad t = 0; \quad (8)$$

$$x_s^*(0) = 0, \quad s = 1, n-1, \quad t = 0. \quad (9)$$

В задаче (1) - (8) условия (4), (5) - граничные условия Стефана на подвижных границах.

Здесь  $\lambda$ ,  $c$ ,  $\rho$ ,  $a$ ,  $T$ ,  $Q$  - теплопроводность, теплоемкость, плотность, температуропроводность, температура, теплота фазовых превращений соответственно.

Решением задач уравнений (1) - (3) с граничными условиями (5) - (7), являются функции:

$$T_1(x, t) = T_1^* \frac{1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_1 t}}\right)}{1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x_1^*(t)}{2\sqrt{a_1 t}}\right)} + T_0 \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_1 t}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{x_1^*(t)}{2\sqrt{a_1 t}}\right)}{1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x_1^*(t)}{2\sqrt{a_1 t}}\right)}, \quad (10)$$

$$x_1^*(t) < x < \infty, t > 0;$$

$$T_s(x, t) = \frac{T_{s-1}^* \operatorname{erf}\left(\frac{x_1^*(t)}{2\sqrt{a_1 t}}\right) - T_{s-1}^* \operatorname{erf}\left(\frac{x_{s-1}^*(t)}{2\sqrt{a_1 t}}\right) + (T_s^* - T_{s-1}^*) \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_s t}}\right)}{\operatorname{erf}\left(\frac{x_s^*(t)}{2\sqrt{a_s t}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{x_{s-1}^*(t)}{2\sqrt{a_s t}}\right)}, \quad (11)$$

$$x_s^*(t) < x < x_{s-1}^*(t), t > 0; s = \overline{2, n-1},$$

$$T_n(x, t) = T_{w1} - (T_{w1} - T_{n-1}^*) \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_n t}}\right)}{\operatorname{erf}\left(\frac{x_{n-1}^*(t)}{2\sqrt{a_n t}}\right)}, \quad 0 < x < x_{n-1}^*(t), t > 0. \quad (12)$$

В выражениях (10) - (12) координаты  $x_s^*(t)$ ,  $s = \overline{1, n-1}$  границ не известны. Для их определения имеются два крайних условия (4), (5) (всего  $2n-2$  крайних условия). Из решений (10) - (12) получаем, что зависимости  $x_s^*(t)$   $s = \overline{1, n-1}$  пропорциональны  $\sqrt{a_s t}$ , то есть:

$$x_s^*(t) = \chi_s \cdot 2\sqrt{a_s t}, \quad s = \overline{1, n-1}, \quad (13)$$

Поскольку  $x_{s-1}^*(t) > x_s^*(t)$ , то  $\chi_{s-1} > \chi_s$ .

Решения (10) - (12) с учетом (13) имеют вид

$$T_1(x, t, \chi_1) = T_1^* \frac{1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_1 t}}\right)}{1 - \operatorname{erf}(\chi_1)} + T_0 \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_1 t}}\right) - \operatorname{erf}(\chi_1)}{1 - \operatorname{erf}(\chi_1)}, \quad (14)$$

$$x_1^*(t) < x < \infty, t > 0;$$

$$T_s(x, t, \chi_{s-1}, \chi_s) = \frac{T_{s-1}^* \operatorname{erf}(\chi_s) - T_s \operatorname{erf}\left(\chi_s \sqrt{\frac{a_{s-1}}{a_s}}\right) + (T_s^* - T_{s-1}^*) \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_s t}}\right)}{\operatorname{erf}(\chi_s) - \operatorname{erf}\left(\chi_{s-1} \sqrt{\frac{a_{s-1}}{a_s}}\right)}, \quad (15)$$

где  $x_1^*(t) < x < x_{s-1}^*(t), t > 0; s = \overline{2, n-1};$

$$T_n(x, t, \chi_{n-1}) = T_{w1} - (T_{w1} - T_{n-1}^*) \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_n t}}\right)}{\operatorname{erf}\left(\chi_{n-1} \sqrt{\frac{a_{n-1}}{a_n}}\right)}, \quad 0 < x < x_{n-1}^*(t), t > 0. \quad (16)$$

Для вычисления коэффициентов  $\chi_s$ ,  $s = \overline{1, n-1}$  подставим (14) - (16) в (4), получим систему уравнений в количестве  $n-1$  относительно  $\chi_s$ ,  $s = \overline{1, n-1}$ .

Вычисляя (1) - (9) для  $n=3$  с двумя границами  $x = x_1^*$  и  $x = x_2^*(t)$ , получаем:

$$F_1(\chi_1, \chi_2) = E \frac{\exp\left(-\chi_1^2 \frac{a_1}{a_2}\right)}{\operatorname{erf}\left(\chi_1 \sqrt{\frac{a_1}{a_2}}\right) - \operatorname{erf}(\chi_2)} - F \frac{\exp(-\chi_1^2)}{1 - \operatorname{erf}(\chi_1)} - \chi_1 = 0, \quad (17)$$

$$F_{11}(\chi_1, \chi_2) = C \frac{\exp(-\chi_2^2 \frac{a_2}{a_3})}{\operatorname{erf}\left(\chi_2 \sqrt{\frac{a_2}{a_3}}\right) - \operatorname{erf}(\chi_2)} - D \frac{\exp(-\chi_2^2)}{\operatorname{erf}\left(\chi_1 \sqrt{\frac{a_1}{a_2}}\right) - \operatorname{erf}(\chi_2)} - \chi_2 = 0, \quad (18)$$

$$E = \sqrt{\frac{\lambda_2 c_2 \rho_2 c_1}{\pi \lambda_1 \rho_1} \frac{T_2^* - T_1^*}{Q_1^*}}; F = \frac{c_1}{\sqrt{\pi}} \frac{T_1^* - T_0^*}{Q_1^*}$$

$$C = \sqrt{\frac{\lambda_3 c_3 \rho_3 c_2}{\pi \lambda_2 \rho_2} \frac{T_{w1} - T_1^*}{Q_2^*}}; D = \frac{c_2}{\sqrt{\pi}} \frac{T_2^* - T_1^*}{Q_2^*}.$$

где  $F_1(\chi_1, \chi_2)$ ,  $F_{11}(\chi_1, \chi_2)$  – дифференцируемые функции.

Подставляя вычисленные значения  $\chi_1$  и  $\chi_2$  в решения (13)-(16), получим температурное поле в трех областях с двумя подвижными границами, координаты которых определены в (13).

### Моделирование задачи теплопроводности лопатки турбины

Задача теплопроводности лопатки турбины [7, 8]:

$$C_{\text{л}} \rho_{\text{л}} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial X} \left( \lambda_{\text{л}} \frac{\partial T}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left( \lambda_{\text{л}} \frac{\partial T}{\partial Y} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left( \lambda_{\text{л}} \frac{\partial T}{\partial Z} \right),$$

где  $X, Y, Z$  – координаты, м;

$T$  – температура, К;

$\tau$  – время, с;

$\lambda_{\text{л}}$  – коэффициент теплопроводности материала лопатки, Вт/(м\*с);

$C_{\text{л}}$  – удельная теплоемкость, Дж/кг\*К;

$\rho_{\text{л}}$  – плотность материала лопатки, кг/м<sup>3</sup>.

Поверхность лопатки со стороны газа:

$$-\lambda_{\text{л}} \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_w = \alpha_i (T_{\text{адw2}} - T_{\text{wf}})$$

Поверхность лопатки со стороны охладителя:

$$-\lambda_{\text{л}} \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_w = \alpha_{\text{охл}} (T_{\text{w2}} - T_{\text{охл}})$$

$T_0$  – температура потока рабочего тела в исходном сечении, К;

$T_{\text{адw2}}$  – адиабатная температура стенки, К;

$T_{\text{wf}}$  – температура поверхности лопатки со стороны рабочего тела, К;

$T_{\text{w2}}$  – температура поверхности лопатки со стороны охладителя, К;

$T_{\text{охл}}$  – температура охладителя, К;

$\alpha_i$  – местный коэффициент теплоотдачи рабочего тела на  $i$ -ой поверхности лопатки, Вт/м<sup>2</sup>К;

$\alpha_{\text{охл}}$  – коэффициент теплоотдачи охладителя, Вт/м<sup>2</sup>К;

$\left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_w$  – градиент температур в лопатке в направлении нормали к ее поверхности

Для нахождения коэффициентов теплоотдачи поверхность лопатки ГТД делится на участки, для которых записывается свое уравнение подобия (рисунок 7).

Моделирование теплообмена между поверхностью лопаток турбины и потоком газа осуществляется путем решения дифференциальных уравнений пограничного слоя, который образуется на поверхности лопатки [9]:

Система уравнений для процесса теплоотдачи на поверхности плоской лопатки:

- дифференциальное уравнение теплоотдачи:

$$\alpha_{\text{г}} = - \frac{\lambda}{|T_{\text{адw}} - T_{\text{w}}|} \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0},$$

- дифференциальное уравнение энергии:

$$\left( \frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) \rho c_p = \frac{\partial}{\partial y} \left[ (\lambda + \lambda_T) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + (\mu + \mu_T) \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \frac{dp}{d\tau} + u \frac{dp}{dx} + q_v,$$

- дифференциальное уравнение движения:

$$\left( \frac{\partial u}{\partial \tau} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) \rho = - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (\mu + \mu_T) \frac{\partial u}{\partial y} \right] + S_v,$$

- дифференциальное уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} = 0;$$

- уравнение состояния:

$$\rho = \frac{P}{RT},$$

Эффективность завесы определяется инженерной зависимостью:  $\theta = \frac{(T_r - T_{адw})}{(T_r - T_{w0})}$ ,

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Дж\м\*К;  
 $\mu$  – динамический коэффициент вязкости, Па\*с;  
 $\lambda_T$  – коэффициент турбулентного переноса теплоты, Дж\м\*К;  
 $\mu_T$  – коэффициент турбулентного переноса количества движения, Дж\кг\*К;  
 $\tau$  – время, с;  
 $\rho$  – плотность, кг\м<sup>3</sup>;  
 $R$  – газовая постоянная, Дж\кг\*К;  
 $P$  – давление потока, Па;  
 $T_{адw}$  – адиабатная температура стенки, К;  
 $T_r$  – температура «восстановления» ядра потока (адиабатная температура стенки при отсутствии завесы), К;  
 $T_w$  – температура поверхности лопатки со стороны рабочего тела, К;  
 $T_{w0}$  – температура поверхности стенки в исходном сечении;  
 $T$  – термодинамическая температура потока, К;  
 $u$  – продольная составляющая скорости, м\с;  
 $v$  – поперечная составляющая скорости м\с;  
 $x$  – продольная координата, м;  
 $y$  – поперечная координата, м;  
 $S_v$  – величина, характеризующая интенсивность внутренних источников количества движения, Па\м;  
 $q_v$  – величина, характеризующая интенсивность внутренних источников теплоты, Вт\м<sup>3</sup>.

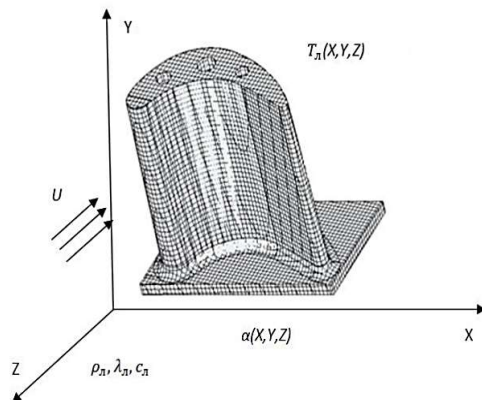


Рисунок 7 –Трехмерная модель лопатки для расчета ее теплового состояния

После построения разностных сеток производится расчет теплового состояния лопатки. На рисунке 8 - 10 показана структура модуля расчета теплового состояния.

Анализ геометрии лопатки и создание разностной сетки разделяется на три стадии: производится генерация узлов разностной сетки, анализируется геометрия лопатки и геометрия расчетных элементов.

Результаты расчета ресурса лопатки от толщины ТЗП приведены в таблице 3.

Таблица 3 - Результаты расчета ресурса покрытий от их толщины

h, мм	T <sub>p</sub> , °C	σ <sub>с.с.</sub> , МПа	Ресурс, ч
0	872	309	6000
0,1	862	308	10000
0,2	852	309	16000
0,5	855	314	45000

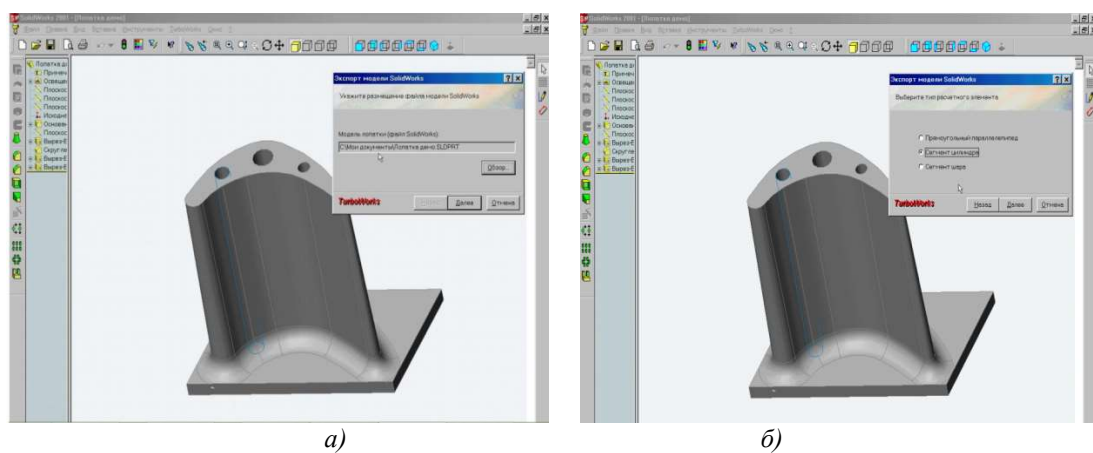


Рисунок 8 – а) размещение файла; б) определение типов расчетных элементов

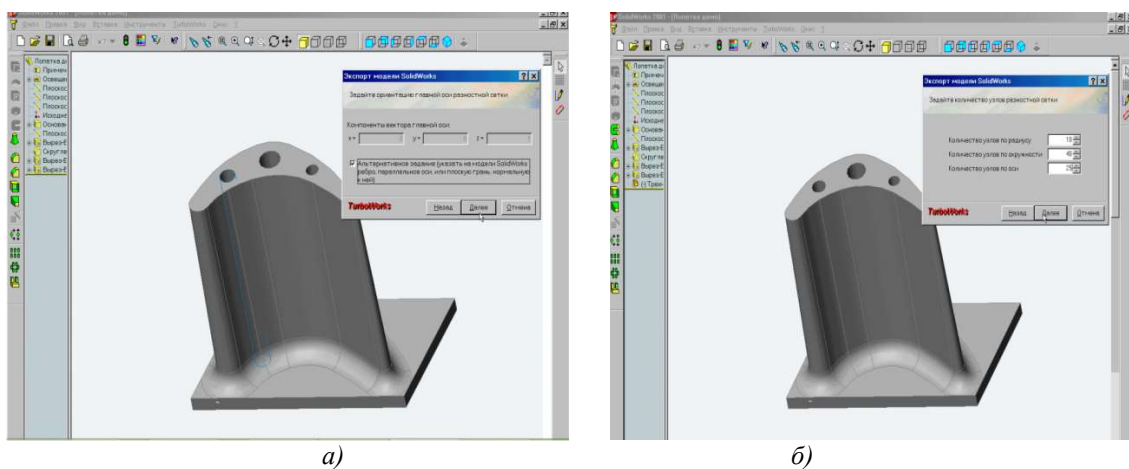


Рисунок 9 – а) задание положения расчетной сетки; б) указание расчетного числа узлов разностной сетки

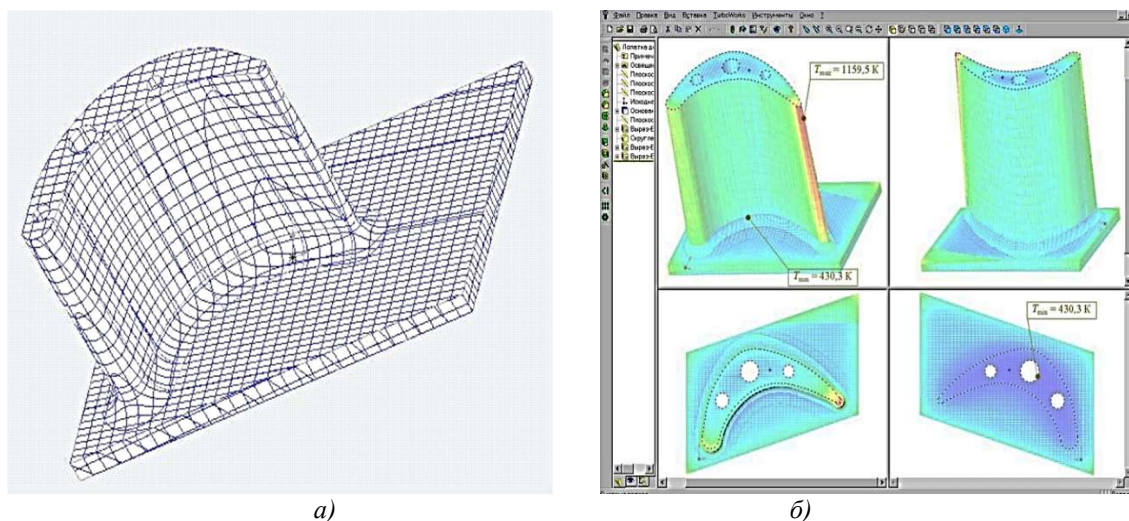


Рисунок 10 – а) сгенерированная расчетная сетка с 4000 элементами (20-45-50); б) процесс задания граничных условий

### Обсуждение результатов испытаний

Максимальная долговечность ТЗП совпадает с максимальным содержанием тетрагональной фазы в структуре покрытия, содержащей небольшие количества моноклинной фазы. Небольшой долговечностью характеризуются покрытия, имеющие кубические структуру (таблица 4).

Таблица 4 – Фазовый состав (% моль) ТЗП в зависимости от содержания  $Y_2O_3$

$Y_2O_3$ (% по массе)	Фазы	Содержание фазы после напыления
4,3	Моноклинная	22
	Кубическая	4
	Тетрагональная	74
6,1	Моноклинная	16
	Кубическая	6
	Тетрагональная	78
8,9	Моноклинная	8
	Кубическая	13
	Тетрагональная	79
19,6	Моноклинная	3
	Кубическая	70
	Тетрагональная	27

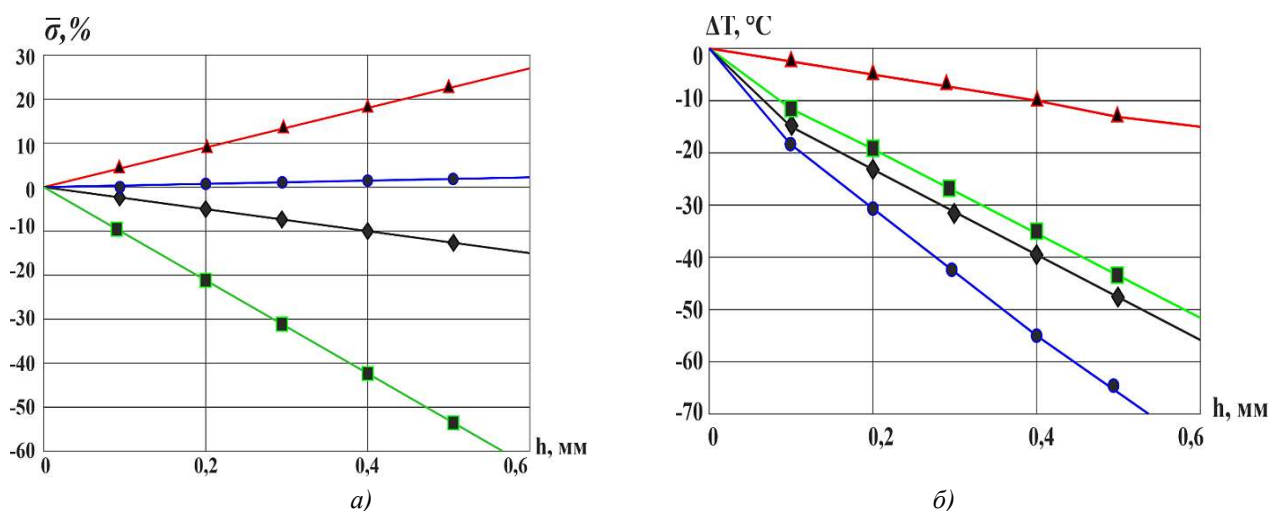


Рисунок 11- а) зависимость максимальной  $\Delta T_{max}$  ( $\blacktriangle$ ), минимальной  $\Delta T_{min}$  ( $\blacksquare$ ) и средней  $\Delta T_{mid}$  ( $\blacklozenge$ ) температуры, температуры в точке с минимальным запасом прочности  $\Delta T_{prz}$  ( $\bullet$ ) от толщины ТЗП в среднем сечении охлаждаемой лопатки; б) зависимость относительного уровня термических напряжений  $\sigma_t$  ( $\blacktriangle$ ), напряжений от центробежных нагрузок  $\sigma_R$  ( $\blacksquare$ ), суммарных напряжений без учета  $\sigma_z$  ( $\blacklozenge$ ) и с учетом  $\sigma_z$  ( $\bullet$ ) ползучести материала лопатки от толщины ТЗП в точке среднего сечения лопатки с минимальным запасом прочности

Стремление улучшить теплозащиту за счет наращивания толщины покрытия бесперспективно, так как при этом будет возрастать изгибающий момент от действия центробежных сил и происходить ускоренное выкрашивание покрытия. Уменьшение толщины ТЗП менее 120 мкм нецелесообразно (рисунок 11) [10,11].

Для определения служебных свойств ТЗП проводят их испытания как лабораторные, так и эксплуатационные. Долговечность при испытаниях ТЗП зависит от максимальной температуры цикла. Критерием разрушения ТЗП считали появление на покрытии трещины, видимой при 10-кратном увеличении (рисунок 12).

Как уже отмечалось, разрушение ТЗП начинается с расслоения керамического слоя. Трещина возникает вблизи поверхности связующего покрытия и вначале распространяется параллельно ей (рисунок 12). Окисление связующего покрытия играет определяющую роль в ослаблении ТЗП. Этот вывод подтверждается тем, что при 1250°C после выдержки более 5 ч в воздушной атмосфере покрытие при охлаждении разрушается, а после выдержки в течение 20 ч и более в атмосфере аргона покрытие сохраняет высокую сопротивляемость разрушению.



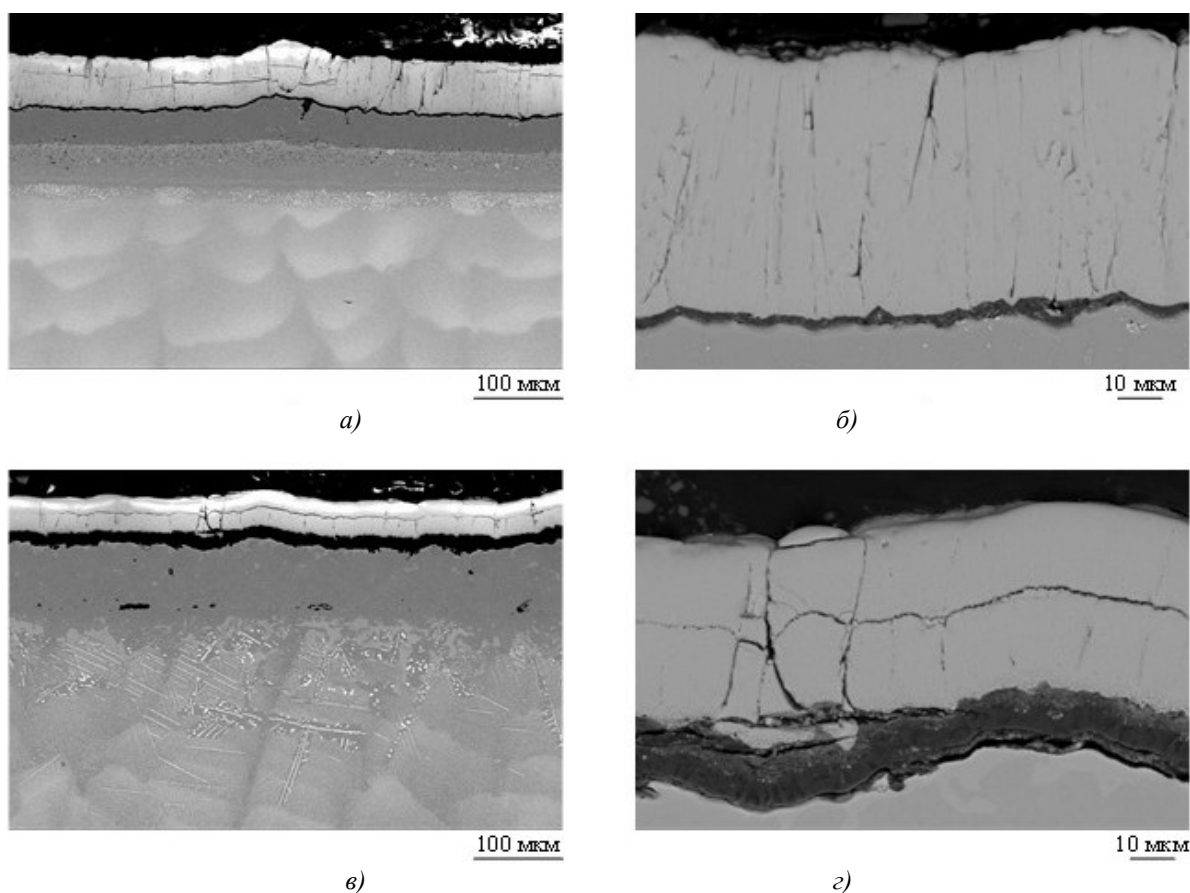


Рисунок 12 – а), б) микроструктуры покрытия ( $n_n=130\text{мкм}$ ; в), г). до и после испытаний ( $T_{\text{исп.}}=1410^\circ\text{C}$ )

### Выводы.

Полагаем, что окисление связующего покрытия определяет долговечность ТЗП.

Исследования позволили установить, что при  $1200^\circ\text{C}$  и выше из связующего покрытия хром диффундирует в подложку, а иттрий – в направлении керамического слоя. Молибден, кобальт и титан из подложки диффундирует в связующее покрытие. С увеличением продолжительности выдержки при  $1200^\circ\text{C}$  в связующем покрытии уменьшаются концентрации хрома и алюминия, уменьшается и количество  $\beta$ - фазы, что ведет и к ухудшению жаростойкости, и к понижению пластичности связующего покрытия при высоких (выше  $800^\circ\text{C}$ ) температурах (рисунок 13).

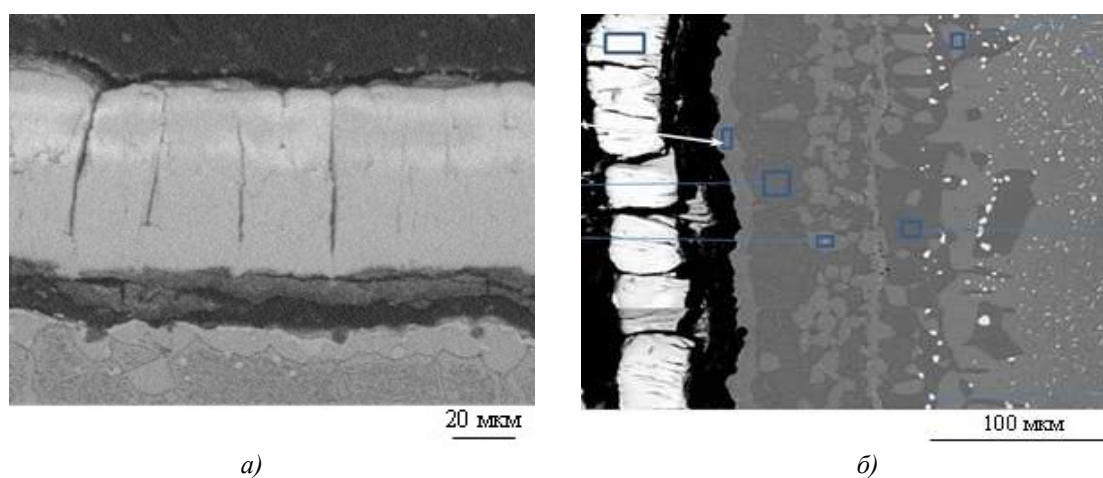


Рисунок 13 - а) разрушение слоя TGO; б) средний химический состав выделенных зон (48,3%Ni-11,4%Al-1,4% Mo-5,7%Cr-3,1%Ta-1,8%W-1,1%Y)



Следует заметить, что уменьшение концентрации алюминия и хрома на границе с керамическим покрытием из-за процесса окисления более значительное, чем уменьшение на границе связующего покрытия с подложкой, где идет диффузионный обмен.

Существует оптимальная толщина покрытия, обеспечивающая максимальную эффективность при данных температурах и действующих нагрузках. Эффективность покрытий зависит от конструкции лопаток и особенно ее системы охлаждения.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Панков В. П. Материаловедение и технология конструкционных материалов. Технологические процессы производства и ремонта летательных аппаратов и авиационных двигателей / В.П. Панков, А.Л. Бабаян, В.И. Табырца [и др.] –Краснодар, 2020. - 224 с.
2. Панков В. П. Материаловедение и технологические процессы в сервисе. / В. П. Панков, В. Е. Жидков. – Ставрополь: ООО «Мысль», 2012. – 337 с.
3. Исследования лопаток турбин авиационных ГТД в процессе эксплуатации и теплозащитных покрытий для них / В.П. Панков // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2024. Т.20. - № 2 (230). - С. 71-78.
4. Панков В.П. Теплозащитные покрытия лопаток турбин авиационных газотурбинных двигателей / В.П. Панков, А.Л. Бабаян, М.В. Куликов, В.А. Коссои, Б.С. Варламов // Ползуновский вестник. - 2021. - №1.-С.161-172.
5. Панков В.П. Исследование диффузионных покрытий, нанесенных методом хромоалитирования в вакууме / В.П. Панков, В.Д. Ковалев // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2020. -Т.16. - № 2 (182). - С. 85-92.
6. Аналитическое исследование задач типа Стефана в композиционных материалах с произвольным числом подвижных границ фазовых превращений / В.Ф. Формалев, Е.Л. Кузнецова, И.А. Селин // Механика композиционных материалов и конструкций. - 2009. -том 15, №2. - С.256-264
7. Панков В.П. Исследование закономерностей формирования диффузионных покрытий, нанесенных хромоалитированием в вакууме / В.П. Панков, И.С. Арустамова, М.В. Степанова, А.Б. Фурсина, М.М. Арутюнян // Упрочняющие технологии и покрытия. -2020.-Т16. -№ 10 (190).- С. 460-467.
8. Панков В. П. Исследование закономерностей формирования диффузионных покрытий на современных жаропрочных никелевых сплавах / В. П. Панков, А. Л. Бабаян, А. А. Швецов [и др.] // Ползуновский вестник. – 2020. – №1. – С.124–129.
9. Панков В.П., Ковалев В.Д. Исследование диффузионных покрытий, нанесенных методов хромоалитирования в вакууме// Упрочняющие технологии и покрытия. - 2020.Т16. № 2. (182). С. 85-92.
10. Панков В.П. Исследования сплавов и покрытий лопаток турбин газотурбинных двигателей в процессе эксплуатации / В.П. Панков // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2016. - № 5(137). -С. 36-40.
11. Панков В.П. Исследования комбинированных жаростойких покрытий лопаток турбин газотурбинных двигателей / В.П. Панков // Упрочняющие технологии и покрытия. 2016.- № 3(135).- С26-30.

**Ковалев Вячеслав Данилович**

Доктор технических наук, профессор  
Начальник отдела АО «Электроавтоматика»  
355016, г. Ставрополь, ул. Заводская, 9  
Тел. 8(918)751-26-72  
E-mail: kwd50@mail.ru

**Радченко Сергей Юрьевич**

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

**Панков Владимир Петрович**

Кандидат технических наук, доцент  
Профессор Краснодарского ВВАУЛ  
350090, г. Краснодар, ул. Дзержинского, 135  
Тел. 8 (918) 861-09-36  
E-mail: pankovvp61@list.ru

**Степанова Марина Валерьевна**

Старший преподаватель кафедры  
общеобразовательных дисциплин  
Краснодарского ВВАУЛ  
350090, г. Краснодар, ул. Дзержинского, 135  
Тел. 8(900)266-98-15  
E-mail: mvs4967@mail.ru

**Швецов Алексей Алексеевич**

Преподаватель кафедры общеобразовательных дисциплин Краснодарского ВВАУЛ  
350005, Краснодар, улица имени Александра Покрышкина, дом 4/4, квартира 213.  
E-mail: saav1968@gmail.com  
Тел. +79528460805

V.D. KOVALEV, V.P. PANKOV, S.YU. RADCHENKO, M.V. STEPANOVA, A.A. SHVETSOV

# THERMAL PROTECTIVE COATINGS OF AVIATION GTE TURBINE BLADES WITH ASSESSMENT OF THEIR THERMAL CONDUCTIVITY AND HEAT RESISTANCE

**Abstract.** *A heat-protective coating for gas turbine turbine blades has been developed, consisting of layers with different physical, thermal and mechanical properties. The problem of the theory of thermal conductivity in a multilayer structure with an assessment of its durability is considered.*

**Keywords:** *coating, structure, alloy, thermal barrier layer, thermal conductivity, temperature, heat of phase transformations.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Pankov V.P. Materials science and technology of structural materials. Technological processes for the production and repair of aircraft and aircraft engines / V.P. Pankov, A.L. Babayan, V.I. Tabyrtsa [and others] – Krasnodar, 2020.-224 p.
2. Pankov V.P. Materials science and technological processes in service. / V. P. Pankov, V. E. Zhidkov. – Stavropol: LLC “Mysl”, 2012. – 337 p.
3. Research of aviation gas turbine engine blades during operation and heat-protective coatings for them / V.P. Pankov // Hardening technologies and coatings. - 2024. T.20. - No. 2 (230). - pp. 71-78.
4. Pankov V.P. Thermal protective coatings of turbine blades of aviation gas turbine engines / V.P. Pankov, A.L. Babayan, M.V. Kulikov, V.A. Kosoi, B.S. Varlamov // Polzunovsky Bulletin. -2021.- No. 1.-P.161-172.Kovalev V.D. Investigation of turbine blades of aircraft engines in operation / V.D. Kovalev, V.P. Pankov, V.P. Gerasimov, M.V. Stepanova / Fundamental and applied problems of engineering and technology. – 2022. – № 2 (352). – Pp.75-82.
5. Pankov V.P. Study of diffusion coatings applied by chromoalizing in a vacuum / V.P. Pankov, V.D. Kovalev // Hardening technologies and coatings. - 2020.-T.16. - No. 2 (182). - P. 85-92.
6. Analytical study of Stefan-type problems in composite materials with an arbitrary number of moving boundaries of phase transformations / V.F. Formalev, E.L. Kuznetsova, I.A. Selin // Mechanics of composite materials and structures. - 2009. - Volume 15, No. 2. - P.256-264
7. Study of the patterns of formation of diffusion coatings applied by chromoalizing in a vacuum / V.P. Pankov, I.S. Arustamova, M.V. Stepanova, A.B. Fursina, M.M. Harutyunyan // Hardening technologies and coatings. -2020.-T16. -No. 10 (190).- P. 460-467.
8. Pankov V.P. Study of the patterns of formation of diffusion coatings on modern heat-resistant nickel alloys / V.P. Pankov, A.L. Babayan, A.A. Shvetsov [etc.] // Polzunovsky Bulletin. – 2020. – No. 1. – P.124–129.
9. Pankov V.P., Kovalev V.D. Study of diffusion coatings applied by chromoalizing methods in a vacuum // Strengthening technologies and coatings.-2020.T16. No. 2. (182). pp. 85-92.
10. Pankov V.P. Research of alloys and coatings of turbine blades of gas turbine engines during operation / V.P. Pankov // Strengthening technologies and coatings. -2016.- No. 5(137). -WITH. 36-40.
11. Pankov V.P. Research of combined heat-resistant coatings of turbine blades of gas turbine engines / V.P. Pankov // Strengthening technologies and coatings. 2016.- No. 3(135).- S26-30.

### Kovalev Vyacheslav Danilovich

Doctor of Technical Sciences. Professor  
Head of Department of JSC "Electroavtomatika"  
355016, Stavropol, Zavodskaya Str., 9  
Tel. 8(918)751-26-72  
E-mail kwd50@mail.ru

### Radchenko Sergey Yuryevich

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

### Pankov Vladimir Petrovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
Professor of Krasnodar VVAUL  
350090, Krasnodar, Dzerzhinskogo str.. 135  
Tel. 8(918)861-09-36  
E-mail: pankov61@list.ru

### Stepanova Marina Valeryevna

Senior teacher of Krasnodar VVAUL  
350090, Krasnodar, Dzerzhinskogo str. 135  
Tel. 8(918)861-09-36  
E-mail: mvs4967@mail.ru

### Shvetsov Alexey Alekseevich

Teacher 106 of the KVVAUL department  
350005, Krasnodar, Alexander Pokryshkin str., house 4/4,  
apartment 213.  
Tel: +79528460805  
E-mail: saav1968@gmail.com

О.Г. КОЖУС, Г.В. БАРСУКОВ, Т.А. ЖУРАВЛЕВА,  
А.В. ПЕТРУХИН, А.А. ЧЕРЕПЕНЬКО

## ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ГИДРОАБРАЗИВНОГО РЕЗАНИЯ ЗА СЧЕТ СНИЖЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СОПЛА ПРИ ВВЕДЕНИИ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ДОБАВОК

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

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

### Введение

Динамика гидроабразивного резания при введении поверхностно-активных веществ (ПАВ) в зону формирования гидроабразивной струи будет определяться способностью их молекул адсорбироваться на поверхности раздела фаз «жидкость – стенки канала сопла» в основном ориентированным образом [1]. Поведение ПАВ на границе раздела фаз определяется рядом сил, включая электростатическое притяжение, ковалентное связывание, водородное связывание, гидрофобное связывание и сольватацию различных частиц [2]. Отмечается, что адсорбция поверхностно активных веществ ПАВ может менять как величину, так и направление электрических сил в электрическом слое вблизи твердой поверхности [3].

Таким образом, с помощью ПАВ гидрофильную поверхность, для которой характерным является притяжение молекул воды, можно преобразовать в гидрофобную поверхность, которая отталкивает эти молекулы [4]. В этом случае оказывается возможным в рамках классической модели вязкой жидкости заменить классическое условие ее прилипания на твердой поверхности на условие проскальзывания вдоль нее с заданной скоростью [5]. В связи с этим при построении моделей движения гидроабразивного потока, модифицированного ПАВ в канале сопла следует учитывать, что определенные виды молекул ПАВ имеют структуру, состоящую из двух элементов – лиофильного и лиофобного [6]. За счет первого элемента они адсорбируются к металлической поверхности. При этом второй элемент направлен в сторону воды. Полное заполнение молекулами ПАВ поверхности металла приводит к образованию сплошного слоя ПАВ, часть которого со стороны жидкости не подвержена действию электрических сил со стороны металла [7]. Она является лиофобной. На основе проведенного анализа сделан вывод, что ее взаимодействие с полярным диэлектриком – водой, может происходить только за счет сил Ван-дер-Ваальса.

В работе [8] представлена модель континуума, с помощью которой можно описать как поляризацию и вызванное этим явление притяжение части слоя ПАВ, которая контактирует с гладкой поверхностью канала сопла, так и взаимодействие ПАВ и металла сопла с помощью сил Ван-дер-Ваальса. В работе Shorkin V.S., Vilchevskaya E.N., Altenbach H. рассматривается второе приложение модели. Это дает возможность при моделировании считать взаимодействующие континуумы – слой ПАВ и воду, образованными электрически нейтральными материальными точками.

Интенсивность адсорбции ПАВ на металлических поверхностях возрастает при увеличении начальной концентрации ПАВ в среде и уменьшении температуры процесса. Установлено, что при прочих равных условиях материал поверхности осаждения также существенно влияет на количество сорбированного на поверхности металла ПАВ вследствие разных величин поверхностного заряда [9]. Лучше всего процесс адсорбции протекает на латунной поверхности, несколько менее интенсивно на медной, далее на поверхности перлитной стали и аустенитной стали. Формирование молекулярных слоев, например, на поверхности перлитной стали, приводит к снижению поверхностного заряда (изопотенциала) с 350-450 мВ до 0-100 мВ в водной среде по отношению к хлорсеребряному электроду.

Определены следующие особенности, характеризующие течение растворов ПАВ в каналах гидравлических систем: утолщение вязкого подслоя; возникновение упругих напряжений и существование запасенной упругой энергии; уменьшение турбулентного

трения; усиление асимметрии в распределении плотности вероятности продольных пульсаций скорости вблизи стенки канала; снижение спектральной плотности турбулентной энергии в области больших волновых чисел.

На основе анализа известных экспериментов по снижению гидравлического сопротивления каналов гидравлических систем определен физический механизм снижения турбулентного трения в потоках с добавками ПАВ. Установлено, что необходимым условием для проявления вязкоупругих свойств является образование в коллоидном растворе, содержащем мицеллы, периодической коллоидной структуры, которая по своим физико-механическим свойствам является промежуточными между идеально упругими телами и ньютоновскими жидкостями [10]. Свойства этих структур сильно зависят от формы, размеров и взаимного положения частиц, а также от толщины разделяющих их жидких прослоек. Это определяется природой действующих в дисперсной системе сил и, соответственно, их величиной, которая зависит от расстояния между частицами и их геометрических параметров [11].

Возникновение упругих напряжений и существование запасенной упругой энергии при течении растворов ПАВ обусловлено деформацией квазикристаллических решеток коллоидных структур в сдвиговом потоке. Поскольку локальные коллоидных структур имеют незначительную степень асимметрии, то действие гидродинамических сил потока будет сводиться лишь к деформации структур без ориентационного эффекта. В силу этого упругие коллоидные структуры будут оказывать демпфирующее действие, как на поперечную, так и на продольную составляющие пульсационной скорости. Одновременное гашение указанных составляющих и приводит к тому, что анизотропия турбулентных пульсаций скорости в растворах ПАВ, по сравнению с полимерными, значительно меньше [12].

Концентрация добавок ПАВ, при которой проявляется эффект снижения трения, составляет десятые доли процента и связана с величиной второй критической концентрацией мицеллообразования. [13]. Отмечается, что растворы ПАВ, после прохождения через местные сопротивления, восстанавливают свою гидродинамическую эффективность [14].

Важной характеристикой является зависимость коэффициента гидродинамического сопротивления трения от числа Рейнольдса  $Re$ . Для течений растворов ПАВ возможны два подхода при построении таких зависимостей. Принципиальное отличие этих подходов проявляется при выборе вязкости в числе Рейнольдса. Вязкость растворов ПАВ сильно зависит от концентрации добавки, что обусловлено образованием в растворе анизометрических мицелл [15].

В целом добавки поверхностно-активных веществ приводят к существенному изменению в распределении энергии пульсаций скорости по спектру волновых чисел. Отмечается, что аналогичное воздействие на перестройку энергетического спектра продольных пульсаций скорости оказывают добавки полимеров [16].

Анализ полученных результатов показывает, что введение добавок мицеллообразующих ПАВ в турбулентный поток жидкости приводит к уменьшению диссипации турбулентной энергии и возрастанию колмогоровского масштаба турбулентности. Таким образом, эффект снижения турбулентного трения в растворах ПАВ связан с уменьшением диссипации кинетической энергии пульсационного движения и увеличения средних линейных размеров турбулентных возмущений (вихрей).

Установлено, что на величину эффекта снижения гидравлического сопротивления существенное влияние оказывают температура растворов ПАВ [17]. Температурная область проявления эффекта снижения гидравлического сопротивления находится между кривой, соединяющей соответствующие для используемых ПАВ точки Крафта и кривой для верхних температур, при которых начинают разрушаться анизометрические мицеллы.

Однако, несмотря на то, что механизмам снижению гидравлического сопротивления и турбулентного трения введением в поток жидкости соответствующим образом подобранных добавок ПАВ в мировой научной литературе посвящено большое количество работ теоретического и прикладного плана, не существует единой точки зрения относительно механизма снижения гидравлического сопротивления и турбулентного трения добавками при высоких скоростях. Трудности в обосновании гипотез связаны со сложностью изучаемого явления, которое с позиций классической гидродинамики обладает рядом аномалий, а также с отсутствием представительной теории неоднородной пристенной турбулентности двухфазного высокоскоростного потока жидкости и абразива.

Для понимания физической природы эффекта снижения сопротивления и построения рациональных схем расчета гидроабразивного потока с добавками ПАВ необходимо знать особенности их влияния на структуру пристенной турбулентности в канале сопла [18, 19]. Изучение характерных свойств турбулентной структуры важно также с точки зрения оптимального использования добавок ПАВ в зоне формирования гидроабразивной струи.

## 2. Основная часть

Моделирование переноса кинетической энергии турбулентности и скорости ее диссипации проведено с учетом того, что с помощью ПАВ гидрофильная поверхность канала фокусирующей трубки сопла преобразована в гидрофобную поверхность, которая отталкивает молекулы воды. Характеристикой этого процесса является условие проскальзывания жидкости вдоль твердой поверхности со скоростью  $u$ .

Скорость проскальзывания на стенке фокусирующей трубки сопла:

$$u_{np} = b \frac{\partial v_z}{\partial z}, \quad (1)$$

где  $b$  – величина смещения профиля скорости течения жидкости с ПАВ в канале фокусирующей трубки сопла.

Схема профиля скорости турбулентного течения жидкости с ПАВ представлена на рисунке 1.

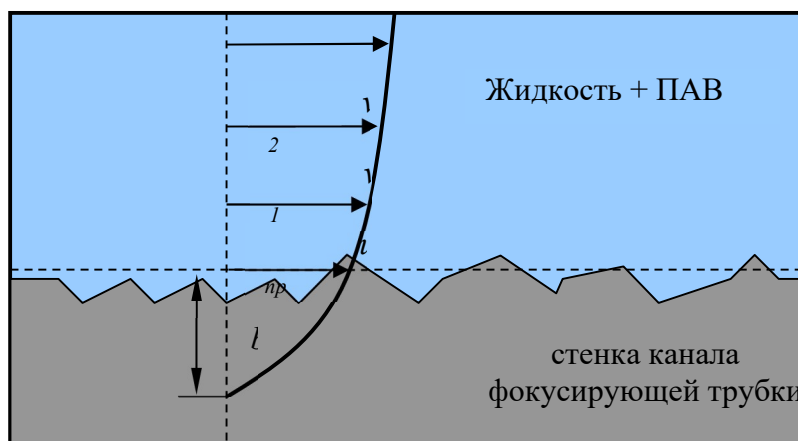


Рисунок 1 - Схема профиля скорости течения жидкости с ПАВ в канале фокусирующей трубки сопла

Предложено величину проскальзывания определять по значению модуля сдвига  $G$ , исходя из того, что в жидкостях касательные напряжения появляются как реакция не на сами деформации, а на их скорости изменения/ Для этого авторами разработана нелокальная модель упругого континуума, объясняющая возможность проскальзывания за счет снижения вязкости поверхностного слоя жидкости с ПАВ из-за уменьшения энергии активации ее молекул [20]. Суть предлагаемой модели в следующем. для оценки изменений вязкости пристенных слоев жидкости ее свойства отражаются в рамках модели нелокальных потенциальных взаимодействий ее микрочастиц  $g(j)$  – в рамках дискретного описания, и репрезентативных макрочастиц  $dV$  континуума, составленных из них. Это допущение позволило моделировать жидкую и твердую среду не различимыми между собой качественно. Таким образом, если (не смотря на малую величину) считать, что в жидкостях, как и в твердых телах  $G \neq 0$ , для характеристики жидкого континуума в данной работе использованы две материальные константы: модуль сдвига  $G \neq 0$  и модуль упругости  $K \neq 0$ . На основе описания напряженно-деформированного состояния континуума «В» получено выражение, которое определяет распределение объемной плотности потенциальной энергии взаимодействия бесконечно тонкого цилиндра из тела В2 и частицы  $dV1$ , расположенной на расстоянии  $x$  от поверхности контакта.

Распределение объемной плотности потенциальной энергии взаимодействия:

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

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

Из (2) получена зависимость для контактного взаимодействия:

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

Приняв условие (4),

$$\Phi_{0(12)}^{(2)} > 0, \quad \Phi_{0(122)}^{(3)} < 0 \quad (4)$$

записано выражение для определения энергии парных и тройных взаимодействий микрочастиц  $dV$  континуума.

Энергия контактного взаимодействия:

$$w(0) = \left( \frac{3}{2} \right) \left( \frac{\Phi_{0(12)}^{(2)}}{\beta_{(12)}^3} - \frac{3}{2} \left| \frac{\Phi_{0(122)}^{(3)}}{\beta_{(12)}^6} \right| \right) \quad (5)$$

Откуда, если выполняется неравенство:

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

то получим, что  $w(0) < 0$ . Адгезии нет. Этот вывод свидетельствует о том, что условие (уравнение 6) является критерием для подбора такого ПАВ, которое может уменьшить вязкость жидкости, контактирующей с ним на стенках канала фокусирующей трубки сопла. 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:

$$\eta = \eta_0 \exp \left( \frac{G}{RT} \right) = \eta_* \exp \left( \frac{G_0 + \Delta G}{RT} \right), \quad (7)$$

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

$G$  - энергия взаимодействия, которая является суммой двух слагаемых – энергии  $G_0$  взаимного притяжения между собой микрочастиц  $q_j$ , содержащихся в одном моле жидкости,

$\Delta G$  - энергия притяжения или отталкивания микрочастиц от поверхности канала фокусирующей трубки сопла.

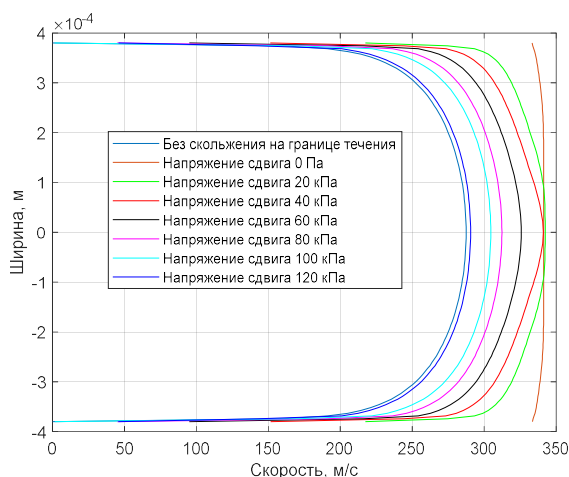
Следовательно, и напряжение трения жидкости вдоль поверхности канала фокусирующей трубки можно записать в следующем виде:

$$\tau = \eta \frac{\partial u_{np}}{\partial z}, \quad (8)$$

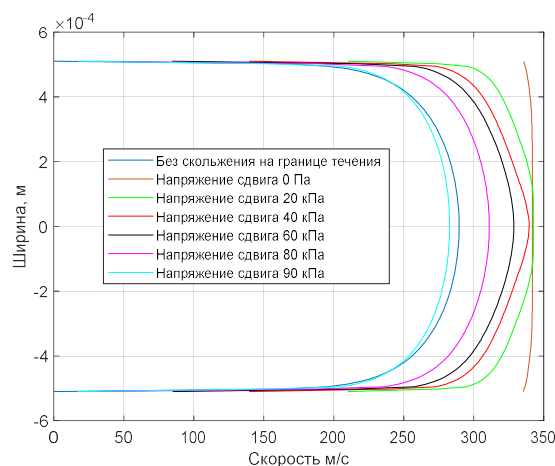
По результатам расчета определено, что в присутствии ПАВ напряжение трения лежит в пределах от 120 до 0 кПа.

Обнаружено, что добавка в воду весьма незначительного количества ПАВ способствует снижению гидравлического сопротивления в турбулентном режиме течения. Так при течении чистой жидкости максимальная скорость на выходе из фокусирующей трубки составляет 280 м/с, а с ПАВ, способствующему снижению пристеночного гидравлического сопротивления, скорость потока растет на 18% до 340 м/с (рисунок 2, 3).

Следует подчеркнуть, что этот эффект возникает при столь малых концентрациях добавок, что все физические свойства жидкости остаются такими же, как и у чистой воды. Область вязкого подслоя не деформирована, в то время как промежуточная область, где вязкое и турбулентное трения соизмеримы, существенно растягивается и практически заполняет весь канал фокусирующей трубки. Ядро течения, там, где оно сохраняется, соответствует обычному закону распределения длины пути смешения. Таким образом, добавки ПАВ не меняют развитого турбулентного течения, деформируя профиль скорости в результате сдвига на стенке канала и увеличения размера промежуточной зоны.



**Рисунок 2 – Профили скоростей на выходе из фокусирующей трубки:  $d_c=0,76$  мм,  $l = 80$  мм**



**Рисунок 3 – Профили скоростей на выходе из фокусирующей трубки:  $d_c=1,02$  мм,  $l = 100$  мм**

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Belhaj, A.F., Elraies, K.A., Mahmood, S.M. et al. The effect of surfactant concentration, salinity, temperature, and pH on surfactant adsorption for chemical enhanced oil recovery: a review. // J Petrol Explor Prod Technol 10, 125–137 (2020). <https://doi.org/10.1007/s13202-019-0685-y>.
2. Thao T.P., Nguyen I., Foad Raj Effects of Charged Surfactants on Interfacial Water Structure and Macroscopic Properties of the Air-Water Interface // ChemPhysChem ( IF 2.9 ) Pub Date: 2023-09-07, DOI:10.1002/cphc.202300062.
3. Vorobiev, P., Bucha S., Lipai, Yu, Cherednichenko, D. & Krutko, N. (2020). Influence of polyelectrolytes and surfactants on the stability of microheterogeneous systems // Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Chemical Series. 56. 271-277. 10.29235/1561-8331-2020-56-3-271-277.
4. I.M. Tucker, A. Burley, R.E. Petkova Promoting the adsorption of saponins at the hydrophilic solid-aqueous solution interface by the coadsorption with cationic surfactants // Journal of Colloid and Interface Science, Volume 654, Part B, 2024, Pages 1031-1039, <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.10.108>.
5. Nizkaia, T., Asmolov E., Harting J., Vinogradova O. (2019). Inertial migration of neutrally-buoyant particles in superhydrophobic channels // Phys. Rev. Fluids 5, 014201 <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.5.014201>.
6. Ali, M., Hasan, T., Khan, J. (2023). Association behavior and physico-chemical parameters of a cetylpyridinium bromide and levofloxacin hemihydrate mixture in aqueous and additive media // RSC Advances. 13. 20709-20722. 10.1039/D3RA02621C.
7. Free, M., Zhu Y. (2022). The Use of Surfactants in Enhanced Particle Removal During Cleaning. 10.1016/B978-0-12-822216-4.00004-5.
8. Shorkin V.S., Vilchevskaya E.N., Altenbach H. Linear theory of micropolar media with internal nonlocal potential interactions. Z Angew Math Mech. 00, e202300099 (2023). <https://doi.org/10.1002/zamm.202300099> / B.C. Шоркин // Z Angew Math Mech. 00, e202300099 (2023). <https://doi.org/10.1002/zamm.202300099>. 2023. C.1-27. Doi: <https://doi.org/10.1002/zamm.202300099>
9. Cremer J, Kiremit S, Klarhorst HJ In-Situ AFM Studies of Surfactant Adsorption on Stainless Steel Surfaces during Electrochemical Polarization// Corrosion and Materials Degradation. 2024. 5(2). P. 224-240. <https://doi.org/10.3390/cmd5020009>.
10. Matras, Z., Kopiczak, B. (2016). The effect of surfactant and high molecular weight polymer addition on pressure drop reduction in pipe flow. Brazilian Journal of Chemical Engineering. 33. 933-943. 10.1590/0104-6632.20160334s20150440
11. Ayegba, P., Edomwonyi-Otu L., Yusuf N., Abubakar A. (2020). A review of drag reduction by additives in curved pipes for single - phase liquid and two - phase flows. Engineering Reports. 3. 10.1002/eng2.12294
12. Kadhim B.J., Mahdy O.S., Alsaedi S.S. Effect of Rigid Xanthan Gums (RXGs) on Flow and Pressure Drops to Improve Drag Reduction Rates in Horizontal Pipe Flow // ChemEngineering. 2023; 7(2):36. <https://doi.org/10.3390/chemengineering7020036>.
13. Free M., Zhu Y. (2022). The Use of Surfactants in Enhanced Particle Removal During Cleaning. 10.1016/B978-0-12-822216-4.00004-5.
14. Anggito U., Alessandro, Riadi A., Gunawan G., Yanuar Y. (2021). Drag Reduction Using Additives in Smooth Circular Pipes Based on Experimental Approach. Processes. 9. 1596. 10.3390/pr9091596.
15. Mahmood, W.K., Abdulkarim, M.H., Abdulbari, H.A. Surfactant–solid complex for enhancing the flow in pipelines: an experimental approach. Beni-Suef Univ J Basic Appl Sci 11, 85 (2022). <https://doi.org/10.1186/s43088-022-00267-3>.
16. Warwaruk L, Ghaemi S. A direct comparison of turbulence in drag-reduced flows of polymers and surfactants. Journal of Fluid Mechanics. 2021;917:A7. doi:10.1017/jfm.2021.264

17. Gong W., Shen J., Dai W., Li Ke, Gong M. (2021). Research and applications of drag reduction in thermal equipment: A review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 172. 121152. 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121152.

18. Кожус О.Г., Барсуков Г.В., Журавлева Т.А., Прасолов Е.А., Петрухин А.В., Бондаренко М.Э. Повышение производительности гидроабразивного резания за счет модификации турбулентного пограничного слоя в канале сопла // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2024. № 2 (364). С. 24-31.

19. Kozhus, O., Barsukov, G., Zhuravleva, T., Petrukhin, A., Tinyakova, E. (2024). Modeling of Surfactant Influence on Liquid Velocity in the Channel of the Focusing Tube of the Nozzle of a Waterjet Unit. In: Radionov, A.A., Gasiyarov, V.R. (eds) *Proceedings of the 10th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-65870-9\\_71](https://doi.org/10.1007/978-3-031-65870-9_71).

20 Кожус О. Г., Галиновский А.Л., Барсуков Г.В., Тинякова Е.А., Петрухин А. В. Анализ образования слоя поверхностно-активного вещества в канале сопла установки для гидроабразивного резания // *Все материалы. Энциклопедический справочник* 2024.- № 7.- С. 35 – 41 DOI: 10.31044/1994-6260-2024-0-7-35-41.

**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

**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

**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

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

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

O.G. KOZHUS, G.V. BARSUKOV, T.A. ZHURAVLEVA,  
A.V. PETRUKHIN, A.A. CHEREPENKO

## INCREASING THE PRODUCTIVITY OF ABRASIVE WATERJET CUTTING BY REDUCING THE HYDRODYNAMIC RESISTANCE OF THE NOZZLE WHEN INTRODUCING SURFACE-ACTIVE ADDITIVES

**Abstract.** *The article presents calculations and modeling results aimed at reducing the hydraulic resistance of the nozzle of a waterjet installation by introducing surface-active substances (SAS), which improves the dynamics of the material cutting process.*

**Keywords:** *waterjet cutting, nozzle, focusing tube, hydraulic resistance, SAS*

### BIBLIOGRAPHY

1. Belhaj, A.F., Elraies, K.A., Mahmood, S.M. et al. The effect of surfactant concentration, salinity, temperature, and pH on surfactant adsorption for chemical enhanced oil recovery: a review. // *J Petrol Explor Prod Technol* 10, 125–137 (2020). <https://doi.org/10.1007/s13202-019-0685-y>.
2. Thao T.P., Nguyen I., Foad Raj Effects of Charged Surfactants on Interfacial Water Structure and Macroscopic Properties of the Air-Water Interface // *ChemPhysChem* ( IF 2.9 ) Pub Date: 2023-09-07, DOI:10.1002/cphc.202300062.
3. Vorobiev, P., Bucha S., Lipai, Yu, Cherednichenko, D. & Krutko, N.. (2020). Influence of polyelectrolytes and surfactants on the stability of microheterogeneous systems // *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Chemical Series*. 56. 271-277. 10.29235/1561-8331-2020-56-3-271-277.
4. I.M. Tucker, A. Burley, R.E. Petkova Promoting the adsorption of saponins at the hydrophilic solid-aqueous solution interface by the coadsorption with cationic surfactants // *Journal of Colloid and Interface Science*, Volume 654, Part B, 2024, Pages 1031-1039, <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.10.108>.
5. Nizkaia, T., Asmolov E., Harting J., Vinogradova O. (2019). Inertial migration of neutrally-buoyant particles in superhydrophobic channels // *Phys. Rev. Fluids* 5, 014201 <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.5.014201>.
6. Ali, M., Hasan, T., Khan, J. (2023). Association behavior and physico-chemical parameters of a cetylpyridinium bromide and levofloxacin hemihydrate mixture in aqueous and additive media // *RSC Advances*. 13. 20709-20722. 10.1039/D3RA02621C.



7. Free, M., Zhu Y. (2022). The Use of Surfactants in Enhanced Particle Removal During Cleaning. 10.1016/B978-0-12-822216-4.00004-5.
8. Shorkin V.S., Vilchevskaya E.N., Altenbach H. Linear theory of micropolar media with internal nonlocal potential interactions. *Z Angew Math Mech.* 00, e202300099 (2023). <https://doi.org/10.1002/zamm.202300099> / B.C. Шоркин // *Z Angew Math Mech.* 00, e202300099 (2023). <https://doi.org/10.1002/zamm.202300099>. 2023. C.1-27. Doi: [doi.org/10.1002/zamm.202300099](https://doi.org/10.1002/zamm.202300099).
9. Cremer J, Kiremit S, Klarhorst HJ In-Situ AFM Studies of Surfactant Adsorption on Stainless Steel Surfaces during Electrochemical Polarization// *Corrosion and Materials Degradation.* 2024. 5(2). P. 224-240. <https://doi.org/10.3390/cmd5020009>.
10. Matras, Z., Kopiczak, B. (2016). The effect of surfactant and high molecular weight polymer addition on pressure drop reduction in pipe flow. *Brazilian Journal of Chemical Engineering.* 33. 933-943. 10.1590/0104-6632.20160334s20150440.
11. Ayegba, P., Edomwonyi-Otu L., Yusuf N., Abubakar A. (2020). A review of drag reduction by additives in curved pipes for single - phase liquid and two - phase flows. *Engineering Reports.* 3. 10.1002/eng2.12294.
12. Kadhim B.J., Mahdy O.S., Alsaedi S.S. Effect of Rigid Xanthan Gums (RXGs) on Flow and Pressure Drops to Improve Drag Reduction Rates in Horizontal Pipe Flow // *ChemEngineering.* 2023; 7(2):36. <https://doi.org/10.3390/chemengineering7020036>.
13. Free M., Zhu Y. (2022). The Use of Surfactants in Enhanced Particle Removal During Cleaning. 10.1016/B978-0-12-822216-4.00004-5.
14. Anggito U., Allesandro, Riadi A., Gunawan G., Yanuar Y. (2021). Drag Reduction Using Additives in Smooth Circular Pipes Based on Experimental Approach. *Processes.* 9. 1596. 10.3390/pr9091596
15. Mahmood, W.K., Abdulkarim, M.H., Abdulbari, H.A. Surfactant–solid complex for enhancing the flow in pipelines: an experimental approach. *Beni-Suef Univ J Basic Appl Sci* 11, 85 (2022). <https://doi.org/10.1186/s43088-022-00267-3>.
16. Warwaruk L, Ghaemi S. A direct comparison of turbulence in drag-reduced flows of polymers and surfactants. *Journal of Fluid Mechanics.* 2021;917:A7. doi:10.1017/jfm.2021.264.
17. Gong W., Shen J., Dai W., Li Ke, Gong M. (2021). Research and applications of drag reduction in thermal equipment: A review. *International Journal of Heat and Mass Transfer.* 172. 121152. 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121152.
18. Kozhus O.G., Barsukov G.V., Zhuravleva T.A., Prasolov E.A., Petrukhin A.V., Bondarenko M.E. Improving the productivity of hydroabrasive cutting due to the modification of the turbulent boundary layer in the nozzle channel. 2024. № 2 (364). Pp. 24-31.
19. Kozhus, O., Barsukov, G., Zhuravleva, T., Petrukhin, A., Tinyakova, E. (2024). Modeling of Surfactant Influence on Liquid Velocity in the Channel of the Focusing Tube of the Nozzle of a Waterjet Unit. In: Radionov, A.A., Gasiyarov, V.R. (eds) *Proceedings of the 10th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering.* Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-65870-9\\_71](https://doi.org/10.1007/978-3-031-65870-9_71).
- 20 Kozhus O. G., Galinovsky A. L., Barsukov G. V., Tinyakova E. A., Petrukhin A. V. Analysis of the formation of a layer of surfactant in the nozzle channel of a waterjet cutting machine // *All materials. Encyclopedic reference book* 2024.- No. 7.- P. 35 – 41 DOI: 10.31044/1994-6260-2024-0-7-35-41.

**Kozhus Olga Gennadyevna**

Oryol State University  
named after I.S. Turgenev,  
Candidate of Technical Sciences,  
Leading Engineer of the  
Department of Organizational  
Support of R&D  
Oryol, Naugorskoe Highway 29  
Tel.: +79038806976  
okozhus@mail.ru

**Barsukov Gennady Valerievich**

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

**Zhuravleva Tatyana Aleksandrovna**

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

**Petrukhin Anton Vladimirovich**

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

**Cherepenko Arkady Anatolyevich**

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

# **МАШИНОВЕДЕНИЕ И МЕХАТРОНИКА**

УДК 629.4.021

DOI: 10.33979/2073-7408-2024-367-5-29-37

С.Н. ЗЛОБИН, М.А. МАСЛОВ, Д.А. БОНДАРЕНКО, С.Г. ВОЛОХОВ

## **ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ КОЛЕСНО-МОТОРНЫХ БЛОКОВ С МАГНИТНЫМИ УСИЛИТЕЛЯМИ СЦЕПЛЕНИЯ**

**Аннотация.** Рассмотрен актуальный вопрос разработки и поиска инновационных решений для тягового привода локомотива, который был усовершенствован за счет внедрения магнитного усилителя сцепления. Развернутое исследование показало, что наиболее эффективной компоновкой является интеграция магнитного усилителя сцепления с обмоткой индуктора, которая оптимально размещается вдоль оси колесной пары локомотива. Этот подход показал наилучшее соответствие всем техническим и эксплуатационным требованиям, которые предъявляются к современным узлам экипажной части локомотивов. В ходе исследования были представлены уникальные и перспективные конструкции тягового привода, которые базируются на использовании дугостаторного асинхронного электродвигателя. Данные конструкции позволяют осуществить установку обмотки магнитного усилителя сцепления непосредственно на ось колесной пары, что является инновационным шагом в данной области. Доказана возможность такого размещения при условии, что диаметр колеса составляет 1050 мм, что в свою очередь обеспечивает как жесткое, так и упругое опирание как тягового электродвигателя (ТЭД), так и магнитного усилителя сцепления на ось колесной пары, что, несомненно, ведет к повышению эффективности экипажной части и всего локомотива в целом. Таким образом, работы по поиску и внедрению новых технологий тягового привода с магнитным усилителем сцепления обнаружили значительный потенциал для дальнейших исследований и разработок в этом направлении, что может привести к значительным улучшениям в области локомотивостроения и эксплуатации железнодорожного транспорта.

**Ключевые слова:** локомотивная тяга, сцепление колеса с рельсом, противобоксовочные устройства, тяговый привод локомотива.

### **Введение**

Одним из путей повышения сцепных свойств локомотивов, позволяющих реализовать возможности современных тяговых двигателей [1 – 3], являются магнитные усилители сцепления (МУС), действие которых основано как на создании дополнительной нагрузки на колесо за счет электромагнитного притяжения к рельсу, так и за счет увеличения коэффициента трения между колесом и рельсом при воздействии магнитного поля [4]. Основным препятствием на данный момент, затрудняющим применение МУС на магистральных локомотивах, являются разные оценки их эффективности, полученные для опытных образцов. Экспериментальные исследования, проведенные на тепловозе ЧМЭЗ [5], оборудованном макетным образцом индуктора (для удешевления опыта, размещенного на путевой структуре) выявили увеличение силы тяги на 8...10 %.

На данный момент основной проблемой при создании МУС является недостаточность знаний о рациональной компоновке МУС и компоновке тягового привода. Предлагаемая статья является попыткой решения этой проблемы.

### **Анализ проблемы**

В ходе работы по оптимизации параметров индуктора [6] принималось в расчет только дополнительное усилие нажатия колеса на рельс, создаваемое магнитным полем индуктора, поскольку во время проведения работ (1977 год) не был доказан факт изменения коэффициента трения под воздействием магнитного поля. Лабораторные же исследования [7] показали возможность увеличения самого коэффициента трения на 22 %. В [8] показано, что для тепловоза ТЭМ2УС-001 реальное повышение нагрузки составляло от 1,94 % до 5,3 %, то есть, являлось незначительным.

Ранее была предложена классификация МУС, в которой принадлежность устройства к догрузателям, либо к устройствам управления коэффициентом сцепления не было принято в качестве отличительного признака [9]. На основании сделанного выше вывода о влиянии на конструкцию МУС того, какой именно из физических эффектов принимается в качестве

основного, а также вследствие того, что авторами после публикации [9] был запатентован ряд новых конструкций увеличителей сцепления, предложена расширенная классификация МУС, показанная на рисунке 1.

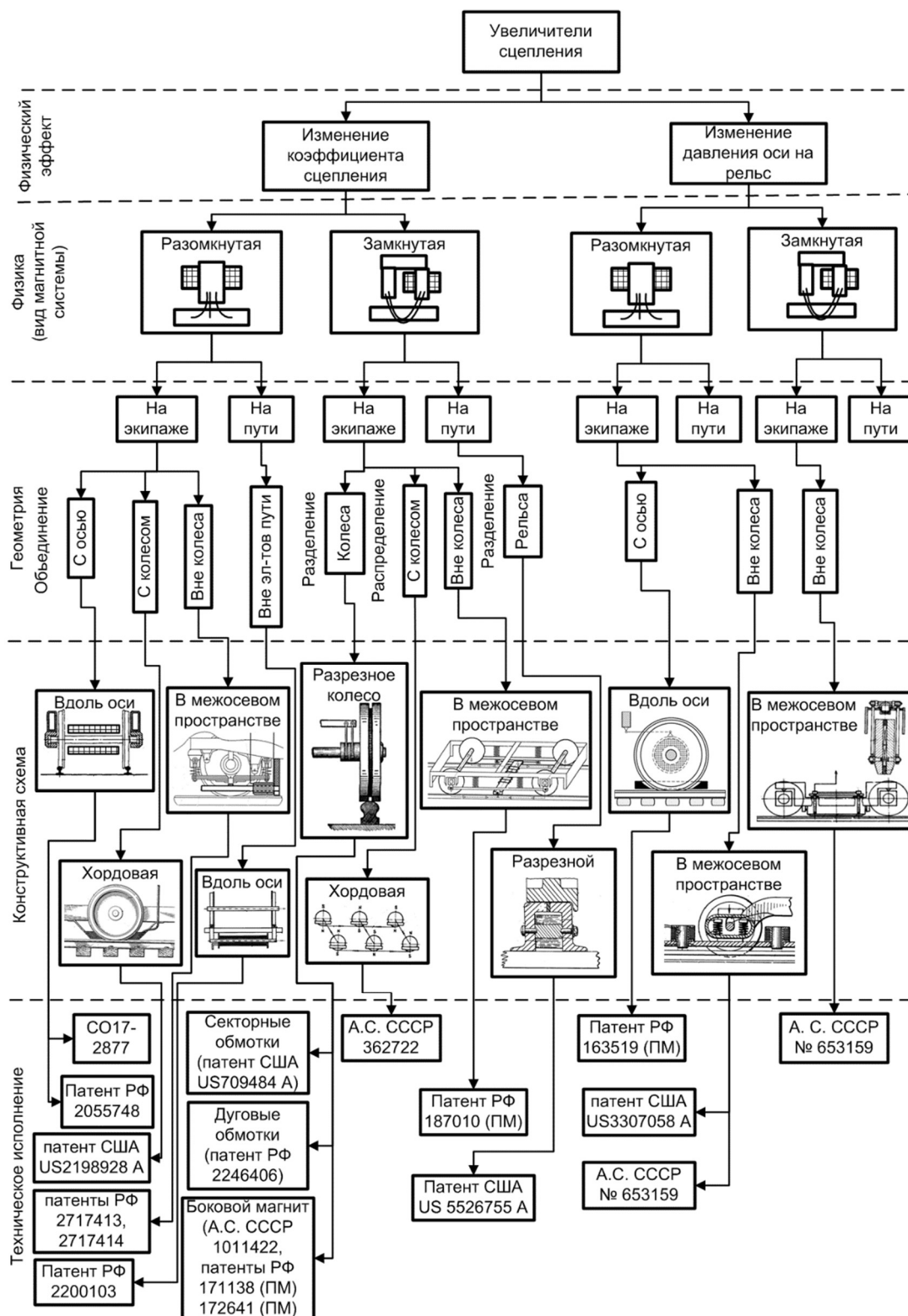


Рисунок 1 – Расширенная классификация конструкций магнитных усилителей сцепления

Классификация имеет пять уровней, для каждого из которых принят свой критерий различия.

На первом уровне МУС предлагается различать по физическим эффектам, используемым в устройстве, выделив две группы: устройства, в которых увеличение

сцепления достигается за счет изменения коэффициента сцепления, и устройства, в которых увеличение сцепления достигается за счет увеличения нагрузки колеса на рельс за счет магнитного притяжения. На втором уровне МУС разделяются по способам реализации, а именно по виду магнитных систем, на устройства с магнитной системой, близкой к замкнутой, у которой геометрические размеры воздушного зазора можно считать незначительными по сравнению с размерами ферромагнитных сердечников, и с разомкнутой, в которой магнитный поток проходит в основном по воздуху.

На третьем уровне в качестве отличительных признаков предложены особенности геометрической конфигурации МУС, а именно расположения индуктора по отношению к другим элементам конструкции. В первую очередь это расположение индуктора на экипаже или пути, которое диктует возможный выбор метода компоновки индуктора. Если индуктор располагается на экипаже при разомкнутой магнитной цепи, то построение компоновки может включать в себя следующие варианты:

- объединение индуктора с элементами экипажа (ось, диск колеса);
- расположение индуктора в виде отдельного элемента.

При замкнутой магнитной цепи для создания компоновки используется прием разделения того или иного элемента экипажа для создания полюсов магнита. Те же приемы используются и для догрузателей, но число возможных вариантов здесь меньше из-за необходимости обеспечить достаточную площадь сечения полюсов индуктора.

Четвертый уровень классификации представляет собой группировку конструктивных схем МУС, полученных на основе указанных выше принципов решения, а пятый уровень представляет собой совокупность типичных примеров технических исполнений для каждой из схем. Рассмотрим эти возможные конструкторские решения.

Вариант магнитной системы с размещением индуктора на оси был запатентован еще в XIX веке [11] и реализован на опытном локомотиве СО17-2877. Для эффективной работы в виде догрузателя данный вариант может быть снабжен дополнительным сердечником, как это предложено и запатентовано в [12]. Размещение индуктора на колесе может быть обеспечено не только осевым, но и хордовым размещением индуктора, который может быть подвешен к необрессоренным массам тележки, как в [13, 14].

Размещение индуктора в межосевом пространстве может быть применено как для устройств управления коэффициентом сцепления (авторами предложены и запатентованы решения [15, 16]), при этом сердечник индуктора подводится к колесу, так и для догрузателей [17, 18], у которых индуктор имеет значительную площадь сечения для создания сил взаимодействия с рельсом.

При замкнутой схеме магнитопровода индуктора типичным является конструктивный прием разделения элемента конструкции для создания двух полюсов. Так, размещение индуктора в колесе может быть реализовано за счет применения разрезного колеса с расположенными внутри секторными или дуговыми обмотками индуктора [19, 20] либо с внешним индуктором, расположенным с торца колеса, обод которого разделен немагнитной вставкой.

В связи с этим имеет смысл рассмотреть лишь ряд новых моментов, в основном связанных с изменением классификации.

Первое. На тепловозе ТЭМ2УС-001 в диапазоне скоростей от 2 до 20 км/ч наблюдаемое дополнительное сопротивление движению увеличилось лишь на 4 Н/т. Это означает, что наведение вихревых токов в деталях экипажной части и путевой структуры не было основной причиной возникновения дополнительного сопротивления, и, таким образом, можно сделать вывод, что хордовое расположение индуктора не создает существенного противоречия между необходимостью увеличивать магнитный поток и снижать дополнительное сопротивление. Причины возникновения дополнительного сопротивления движению на тепловозе ТЭМ2УС-001 требуют дополнительного изучения.

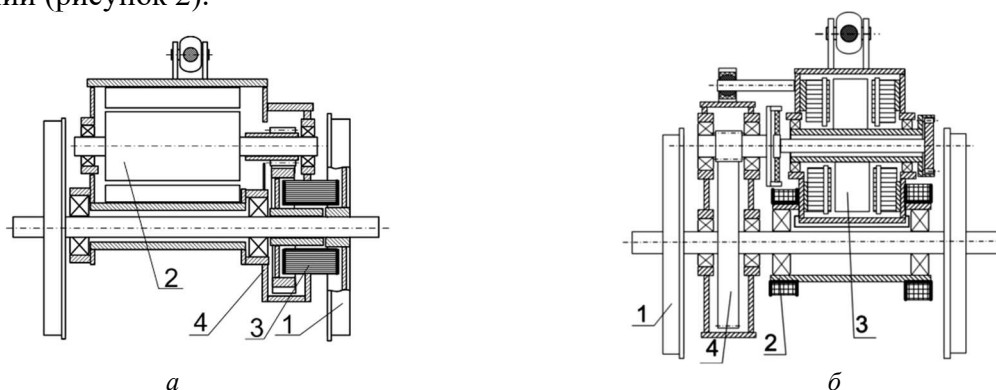
Второе. С учетом предложенной конструкции [12], в которой дополнительный сердечник с хордовым расположением относительно колеса позволяет увеличить силы магнитного притяжения колеса к рельсу, схема с расположением обмотки индуктора на оси

колесной пары может быть эффективна как для МУС, управляющих коэффициентом сцепления, так и для догрузателей.

Также необходимо отметить, что расположение обмотки на оси колесной пары обеспечивает наибольшую безопасность с точки зрения соблюдения габаритов подвижного состава и возможности попадания посторонних предметов между деталями экипажной части и путевой структуры и деталями МУС. Таким образом, анализ подтверждает вывод о том, что компоновка МУС с обмоткой индуктора, размещенной вокруг оси колесной пары, в наибольшей степени соответствует требованиям, предъявляемым к узлам экипажной части локомотива. Основным противоречием требований для этой компоновки является требование максимального увеличения размеров обмотки для увеличения создаваемого магнитного потока и требования уменьшения размеров обмотки для размещения ее на экипажной части. В связи с этим рассмотрим возможные пути разрешения этого противоречия.

### Предлагаемые решения

Предложен и запатентован ряд решений, позволяющих увеличить место для размещения обмотки индуктора на оси колесной пары. Эти решения можно условно разделить на решения, увеличивающие пространство для размещения обмотки в радиальном и осевом направлении (рисунок 2).



**Рисунок 2 – Компоновка тягового привода с увеличенным пространством для размещения обмоток индуктора:** 1 – колесная пара; 2 – обмотка индуктора; 3 – тяговый электродвигатель; 4 – рама тележки; 5 – осевой редуктор; 6 – рамный редуктор

В варианте на рисунке 2, а дополнительное пространство создается за счет применения тягового электродвигателя с осевым магнитным потоком, что позволяет разместить обмотки индуктора на шапках узлов моторно-осевых подшипников. Конструкция данного привода подробно рассмотрена для электровоза с диаметром колеса 1250 мм. Исходя из расчетных данных, приведенных для проекта двигателя АД-3, и передаточного отношения редуктора, равного  $u = 4,21$ , в данном приводе можно получить осевую силу тяги в часовом режиме, равную 96,3 кН. Однако при диаметре колеса 1050 мм преимущества схемы с осевым магнитным потоком становятся менее явными из-за уменьшения радиального габарита тягового электродвигателя.

Таким образом, предложенные ранее конструктивные схемы имеет смысл реализовывать в первую очередь при диаметре колеса 1250 мм, в то время, как маневрово-промышленные тепловозы, для которых применение МУС позволит снизить расход энергии за счет уменьшения массы, имеют диаметр колеса 1050 мм. В этом случае разрешить противоречие между необходимостью увеличивать диаметр обмотки МУС, размещенной на оси колесной пары, для увеличения магнитного потока, и между необходимостью уменьшать диаметр обмотки МУС для того, чтобы поместить обмотку между осью и корпусом тягового электродвигателя. Это возможно путем установки промежуточного колеса в тяговую передачу, однако такой вариант ведет к увеличению продольных габаритов колесно-моторного блока и к необходимости создания новой тележки с большей базой. Помимо деунификации экипажной части локомотивов, при трехосной тележке увеличение базы ведет к увеличению воздействия на путь тепловоза в кривых.

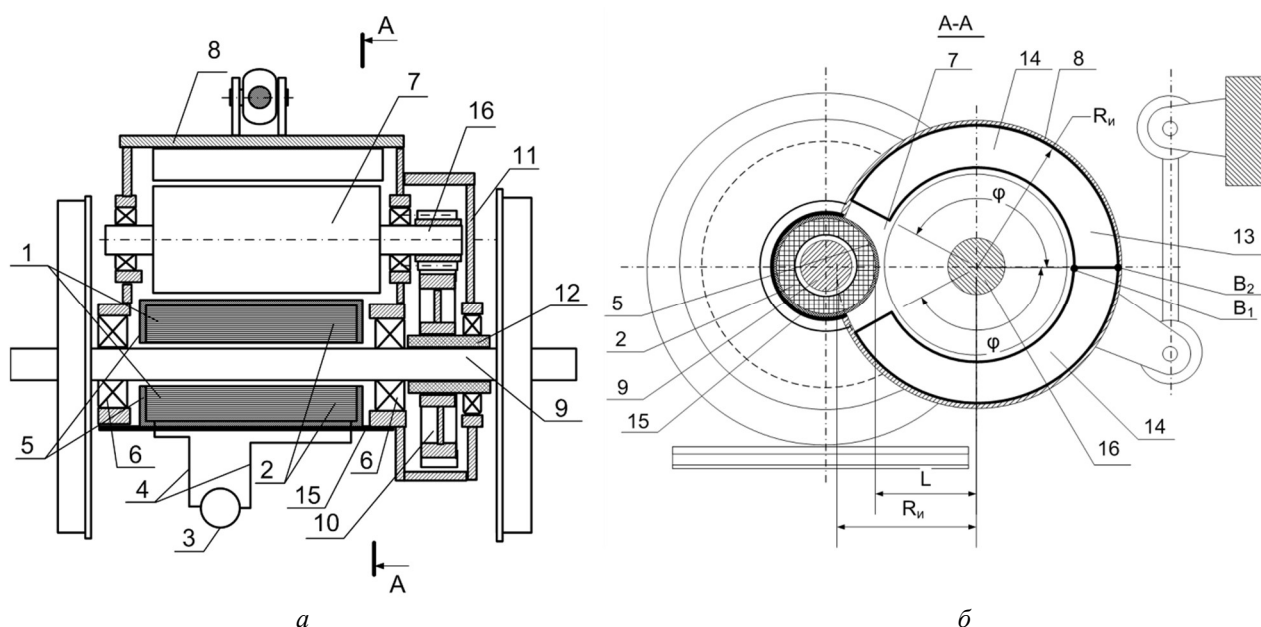
В связи с этим авторами были предложены конструкции тягового привода, интегрированного с МУС, в которой для разрешения указанного противоречия был использован прием размещения обмотки МУС на оси в габаритах тягового электродвигателя. В двигателях, используемых в настоящее время на подвижном составе, такая компоновка невозможна из-за антагонизма свойств индуктора и двигателя (нельзя разместить в одном и том же месте обмотку и детали статора). Использование принципов технической инновационики позволило найти решение, при котором данный антагонизм свойств можно снять – это применение электрической машины, в которой статор не представляет собой замкнутого кольца. К таким машинам относятся дугостаторные асинхронные электродвигатели, которые могут быть применены в качестве тяговых для локомотива.

Предлагаемые варианты приводов представлены на рисунках 3 и 4.

На рисунке 3 показан вариант для опорно-осевого привода. При пропускании по катушке 2 тока от источника питания 3 возникает магнитный поток, проходящий через ось колесной пары 9, оба колеса колесной пары и рельсы (на рисунке 3, а не показаны). Это приводит к изменению физико-механических свойств в зоне контакта металлических тел (колес с рельсами) и изменяет коэффициент сцепления колес с рельсами. Кожух 15 препятствует попаданию пыли и грязи внутрь тягового электродвигателя 7.

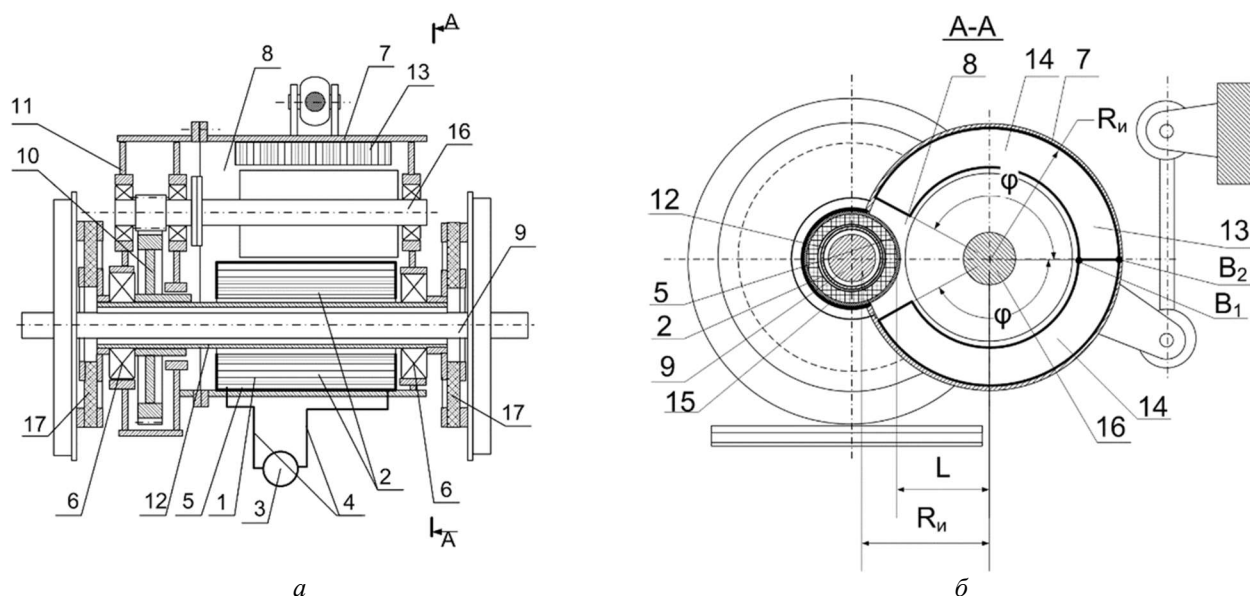
Статор 13 тягового электродвигателя 7 выполнен в виде двух одинаковых дугообразных индукторов 14.

Концы индукторов 14 соединены друг с другом со стороны, противоположной оси колесной пары 9, по линии  $B_1B_2$  (см. рисунок 3, б), а противоположные концы индукторов 14 не смыкаются друг с другом. Корпус 8 тягового электродвигателя 7 имеет выемку в месте расположения концов индукторов 14, удаленных друг от друга. Выемка закрыта кожухом 15, каркас 5 катушки 2 закреплен на корпусе 8 тягового электродвигателя 7 с помощью кожуха 15. Как видно из рисунка 3, б, расстояние  $L$  от наружной поверхности каркаса 5 катушки 2 до центра вала 16 тягового электродвигателя 7 меньше, чем величина  $R_{и}$  (радиус индуктора 14 по наружной стороне).



**Рисунок 3 – Предлагаемый опорно-осевой тяговый привод с МУС и дугостаторным асинхронным электродвигателем: а – общий вид; б – разрез по оси А-А;**

- 1 – намагничивающая обмотка; 2 – катушка; 3 – источник питания; 4 – провода; 5 – каркас;  
6 – моторно-осевые подшипники; 7 – тяговый электродвигатель (ТЭД); 8 – корпус ТЭД;  
9 – ось колесной пары; 10 – зубчатое колесо; 11 – кожух редуктора; 12 – немагнитная втулка;  
13 – статор ТЭД; 14 – дугообразный индуктор; 15 – кожух; 16 – вал ТЭД



**Рисунок 4 – Предлагаемый тяговый привод с МУС и дугостаторным асинхронным электродвигателем при упругом опирании ТЭД на ось: а – общий вид; б – разрез по оси А-А;**  
 1 – намагничивающая обмотка; 2 – катушка; 3 – источник питания; 4 – провода; 5 – каркас;  
 6 – подшипники; 7 – корпус ТЭД; 8 – ТЭД; 9 – ось колесной пары; 10 – зубчатое колесо;  
 11 – кожух редуктора; 12 – немагнитная втулка; 13 – статор ТЭД; 14 – индукторы; 15 – кожух;  
 16 – вал ТЭД; 17 – упругие элементы

Благодаря выполнению статора 13 тягового электродвигателя 7 в виде двух дугообразных индукторов 14, не соединенных друг с другом со стороны оси колесной пары 9, и наличию в корпусе 8 тягового электродвигателя 7 выемки появляется возможность для увеличения магнитного потока, проходящего через колеса и рельсы путем увеличения наружного диаметра катушки 2, поскольку наружный диаметр каркаса 5 катушки 2, в отличие от рассмотренных выше аналогов, можно при той же самой величине централи тяговой передачи и передаточном отношении можно увеличить до размеров, при которых расстояние от наружной поверхности каркаса 5 катушки 2 до центра вала 16 тягового электродвигателя 7 меньше, чем величина радиуса индуктора 14 по наружной стороне, при числе пар полюсов больше, чем 2, так как катушка 2 располагается в выемке.

Как видно из рисунка 3, б, длина каждого из индукторов 14 по наружной стороне будет равна  $L_{\text{и}} = \pi R_{\text{и}} \varphi / 180$ , где  $R_{\text{и}}$  – радиус индуктора по наружной стороне, а  $\varphi$  – угол между торцами индуктора в градусах. Как показано на рисунке 3, б,  $\varphi < 180^\circ$ , таким образом,  $L_{\text{и}}$  меньше, чем длина полуокружности с радиусом, равным  $R_{\text{и}}$ , и два индуктора 14 вместе образуют лишь часть окружности.

На предложенный тяговый привод получен патент на полезную модель [21].

Недостаток рассмотренного привода состоит в том, что опирание обмотки МУС на ось колесной пары увеличивает необрессоренную массу локомотива. На рисунке 4 изображен вариант привода интегрированной компоновки с упругим опиранием на ось колесной пары, что снижает воздействие на путь. В качестве упругих элементов применены плоские резинокордные элементы, что позволяет использовать привод с упругим опиранием для тепловозов с диаметром колес 1050 мм. Принцип работы привода тот же, что и у описанного выше. На конструкцию привода подана заявка на получение патента на полезную модель.

### Заключение

Установлено, что основным препятствием при создании МУС является недостаточность знаний о рациональной компоновке МУС и компоновке элементов экипажной части, в первую очередь, тягового привода, позволяющей реализовать рациональные технические решения МУС. Установлено, что причиной незначительной эффективности МУС, примененных на опытном тепловозе ТЭМ2УС-001 явилось отсутствие на момент проектирования знаний о влиянии магнитного поля на коэффициент сцепления колеса с рельсом, в результате чего магнитный поток был заведомо недостаточным. Доказано, что для МУС, которые должны увеличивать осевую нагрузку (магнитные догрузатели) и



МУС, которые должны управлять коэффициентом сцепления, оптимальная конструкция будет различаться.

Предложена новая классификация МУС, учитывающая разделение на магнитные догружатели и устройства безынерционного регулирования коэффициента сцепления. Классификация охватывает новые конструкции МУС, запатентованные авторами. Из анализа классификации следует, что компоновка МУС с обмоткой индуктора, размещенной вокруг оси колесной пары, в наибольшей степени соответствует требованиям, предъявляемым к узлам экипажной части локомотива. Основным противоречием требований для этой компоновки является требование максимального увеличения размеров обмотки для увеличения создаваемого магнитного потока и требования уменьшения размеров обмотки для размещения ее на экипажной части. На основании анализа ранее запатентованных авторами конструкций тягового привода с увеличением пространства для размещения МУС предложены новые конструкции тягового привода с дугостаторным асинхронным электродвигателем, обеспечивающие возможность размещения обмотки МУС на оси колесной пары при диаметре колеса 1050 мм, при жестком и упругом опирании ТЭД и МУС на ось колесной пары. По теме статьи авторами получено два патента на изобретения, семь патентов на полезные модели и подана заявка на получение патента.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Космодамианский, А.С. Синхронные тяговые электродвигатели в приводах перспективных локомотивов / А.С. Космодамианский, С.Н. Злобин, О.В. Измеров // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2023. – № 2(358). – С. 124-137.
2. Модернизация колесно-моторного блока электровоза 2ЭС6 / В.И. Воробьев, О.В. Измеров, М.И. Борзенков [и др.] // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2018. – № 4-1(330). – С. 131-139.
3. Тяговый привод локомотивов с высокомоментным коллекторным тяговым электродвигателем / О.В. Дорофеев, В.И. Воробьев, М.И. Борзенков [и др.] // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2021. – № 2(346). – С. 118-129.
4. Техническая инновационика. Применение физико-технических эффектов при конструировании транспортных машин / В.И. Воробьев, С.Н. Злобин, О.В. Измеров [и др.]. – Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева, 2023. – 208 с. – ISBN 978-5-9929-1423-8.
5. Улучшение тяговых качеств локомотивов с помощью магнитных усилителей сцепления: монография / Д.Я. Антипин, В.И. Воробьев, О.В. Измеров, В.О. Корчагин, А.С. Космодамианский, А.А. Пугачев. – Брянск, БГТУ, 2018. – 232 с.
6. Исследования по оптимизации параметров магнитопровода системы электромагнитного увеличителя сцепления и определения сил притяжения колес к рельсам / К.С. Сдобин, С.М. Антонов, Ю.М. Лужнов // Промежуточный отчет по теме «Исследование и разработка различных способов контакта колесных пар локомотива с рельсами». – № И-32-77. – Коломна: ВНИКТИ, 1977. – 33 с.
7. Улучшение тяговых качеств тепловозов воздействием постоянного магнитного поля на контакт трибосистемы «колесо-рельс»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / О.В. Корчагин. – М.: МИИТ, 2017. – 175 с.
8. Исследования по повышению тяговых свойств маневровых тепловозов путем применения электромагнитного увеличения сцепления и более оптимальных схем соединения тяговых электродвигателей / Е.А. Ситников, И.Н. Родионов, В.П. Гриневич // Заключительный отчет по теме «Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по повышению эксплуатационных качеств, надежности и долговечности тепловоза». – № И-108-82. – Коломна: ВНИКТИ, 1982. – 83 с.
9. Техническая инновационика. Классификации в технике / А.С. Космодамианский, В.И. Воробьев, Д.В. Воробьев [и др.]. – Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева, 2023. – 186 с. – ISBN 978-5-9929-1305-7.
10. Методы поиска конструкции тягового привода локомотива с минимальными потерями энергии в эксплуатации / В.И. Воробьев, С.Г. Волохов, О.В. Измеров, В.О. Корчагин // *Энерго- и ресурсосбережение – XXI век: материалы XII международной научно-практической интернет-конференции*, 15 марта – 30 июня 2014 г., г. Орёл / под редакцией д-ра техн. наук, проф. О.В. Пилипенко, д-ра техн. наук, проф. А.Н. Качанова, д-ра техн. наук, проф. Ю.С. Степанова. – Орёл: Госуниверситет-УНПК, 2014. – С. 162-166.
11. Патент US414996 США. Combined electro magnetic brake and traction increasing device / Ries E.E.; опубл. 12.11.1889.
12. Патент 163519 Российская Федерация, МПК B61C 15/08, B60L 15/20. Устройство для увеличения сцепления ведущих колес локомотива с рельсами / Воробьев В.И., Новиков В.Г., Измеров О.В., Корчагин В.О., Авдащенко В.С., Моспанова М.Ю.; опубл. 20. 07. 2016, Бюл. № 20.
13. Патент US2198928 А США. Wehner David E. Electromagnetic traction increaser; опубл. 02.12.1936.
14. А.с. 362722 СССР. Устройство для повышения коэффициента сцепления ведущих колес локомотива с рельсами / Л.И. Тимофеев; опубл. 1973, Бюл. № 3.

15. Патент 2717413, Российская Федерация, СПК В61С 15/08. Устройство для увеличения сцепления ведущих колес локомотива с рельсами / Антипин Д.Я., Воробьев В.И., Корчагин В.О., Измеров О.В., Бондаренко О.И.; Оpubл. 23.03.2020, Бюл. № 9.

16. Патент 2717414 Российская Федерация, СПК В61С 15/08. Устройство для увеличения сцепления ведущих колес локомотива с рельсами / Антипин Д.Я., Воробьев В.И., Корчагин В.О., Измеров О.В., Бондаренко О.И.; опубл. 23.03.2020, Бюл. № 9.

17. Патент US3307058 А США. Electromagnetic adhesion means for railroad locomotives / Karel Kucera; опубл. 20.01.1964.

18. А. с. 653159 СССР. Магнитный догружатель рельсового транспортного средства / В.В. Мишин, В.А. Зябров, А.И. Лебедев, В.А. Салов, Э.М. Шляхов; опубл. 30.01.1987, Бюл. № 4.

19. Патент US709484 А США. Magnetic wheel / John Otto Heinze Jr.; опубл. 24.02.1902.

20. Патент 2246406 Российская Федерация, МПК В60В 37/00, В61С 15/04. Колесная пара локомотива / Е.В. Сливинский, А.А. Зайцев, С.В. Бровко, Е.И. Воробьев; опубл. 20.02.2005, Бюл. № 5.

21. Патент 223262 U1 Российская Федерация, МПК В61С 9/50, В61F 15/16. Тяговый привод локомотива / С.Н. Злобин, В.И. Воробьев, О.В. Измеров [и др.]; опубл. 09.02.2024.

**Злобин Сергей Николаевич**

Орловский государственный университет имени  
И.С. Тургенева, г. Орёл  
Кандидат технических наук, доцент кафедры  
машиностроения  
E-mail: zsn2@rambler.ru

**Бондаренко Денис Андреевич**

Брянский государственный технический  
университет, г. Брянск  
Кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Подвижной состав железных дорог»  
E-mail: dilekter@gmail.com

**Маслов Максим Александрович**

Брянский государственный технический  
университет, г. Брянск  
Кандидат технических наук, старший  
преподаватель кафедры «Трубопроводные  
транспортные системы»  
E-mail: maslovmaksim32@mail.ru

**Волохов Станислав Григорьевич**

ООО «ТМХ Инжиниринг», г. Брянск  
Кандидат технических наук, ведущий инженер-  
конструктор  
E-mail: aivent@mail.ru

---

S.N. ZLOBIN, M.A. MASLOV, D.A. BONDARENKO, S.G. VOLOKHOV

**TECHNICAL SOLUTIONS FOR WHEEL-MOTOR UNITS  
WITH MAGNETIC CLUTCH ASSISTS**

**Abstract.** *The topical issue of developing and searching for innovative solutions for the traction drive of a locomotive, which was improved through the introduction of a magnetic clutch amplifier, is considered. Extensive research has shown that the most effective layout is the integration of a magnetic clutch amplifier with an inductor winding, which is optimally placed along the axis of the locomotive wheelset. This approach has shown the best compliance with all technical and operational requirements that apply to modern components of the locomotive undercarriage. During the study, unique and promising traction drive designs were presented, which are based on the use of an arc-storing asynchronous electric motor. These designs make it possible to install the magnetic clutch booster winding directly on the axle of the wheelset, which is an innovative step in this area. The possibility of such placement has been proven, provided that the wheel diameter is 1050 mm, which in turn provides both rigid and elastic support of both the traction electric motor (TEM) and the magnetic clutch amplifier on the axis of the wheelset, which, undoubtedly, leads to increased efficiency of the crew and the entire locomotive as a whole. Thus, work on the search and implementation of new technologies for traction drive with a magnetic clutch amplifier has revealed significant potential for further research and development in this direction, which can lead to significant improvements in the field of locomotive construction and operation of railway transport.*

**Keywords:** *locomotive traction, wheel-rail adhesion, anti-slip devices, locomotive traction drive.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Kosmodamianskiy, A.S. Sinkhronnyye tyagovyye elektrodvigateli v privodakh perspektivnykh lokomotivov / A.S. Kosmodamianskiy, S.N. Zlobin, O.V. Izmerov // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2023. – № 2(358). – S. 124-137.

2. Modernizatsiya kolesno-motornogo bloka elektrovoza 2ES6 / V.I. Vorobyev, O.V. Izmerov, M.I. Borzenkov [i dr.] // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2018. – № 4-1(330). – S. 131-139.

3. Tyagovyy privod lokomotivov s vysokomomentnym kollektornym tyagovym elektrodvigatelem / O.V. Dorofeyev, V.I. Vorobyev, M.I. Borzenkov [i dr.] // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2021. – № 2(346). – S. 118-129.

4. Tekhnicheskaya innovatsionika. Primeneniye fiziko-tekhnicheskikh effektov pri konstruirovani transportnykh mashin / V.I. Vorobyev, S.N. Zlobin, O.V. Izmerov [i dr.]. – Orol: OGU imeni I.S. Turgeneva, 2023. – 208 s. – ISBN 978-5-9929-1423-8.
5. Uluchsheniye tyagovykh kachestv lokomotivov s pomoshchyu magnitnykh usiliteley stsepleniya: monografiya / D.YA. Antipin, V.I. Vorobyev, O.V. Izmerov, V.O. Korchagin, A.S. Kosmodamianskiy, A.A. Pugachev. – Bryansk, BG TU, 2018. – 232 s.
6. Issledovaniya po optimizatsii parametrov magnitoprovoda sistemy elektromagnitnogo uvelichitelya stsepleniya i opredeleniya sil prityazheniya koles k relsam / K.S. Sdobin, S.M. Antonov, YU.M. Luzhnov // Promezhutochnyy otchet po teme «Issledovaniye i razrabotka razlichnykh sposobov kontakta kolesnykh par lokomotiva s relsami». – № I-32-77. – Kolomna: VNIKTI, 1977. – 33 s.
7. Uluchsheniye tyagovykh kachestv teplovozov vozdeystviem postoyannogo magnitnogo polya na kontakt tribosistemy «koleso-rels»: dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk / O.V. Korchagin. – M.: MIIT, 2017. – 175 s.
8. Issledovaniya po povysheniyu tyagovykh svoystv manevrovnykh teplovozov putem primeneniya elektromagnitnogo uvelicheniya stsepleniya i boleye optimalnykh skhem soyedi-neniya tyagovykh elektrodvigatelay / Ye.A. Sitnikov, I.N. Rodionov, V.P. Grinevich // Zaklyuchitelnyy otchet po teme «Nauchno-issledovatel'skiye i opyt-no-konstruktorskiye raboty po povysheniyu ekspluatatsionnykh kachestv, nadezhnosti i dolgovechnosti teplovoza». – № I-108-82. – Kolomna: VNIKTI, 1982. – 83 s.
9. Tekhnicheskaya innovatsionika. Klassifikatsii v tekhnike / A.S. Kosmodamianskiy, V.I. Vorobyev, D.V. Vorobyev [i dr.]. – Orol: OGU imeni I.S. Turgeneva, 2023. – 186 s. – ISBN 978-5-9929-1305-7.
10. Metody poiska konstruksii tyagovogo privoda lokomotiva s minimalnymi poteryami energii v ekspluatatsii / V.I. Vorobyov, S.G. Volokhov, O.V. Izmerov, V.O. Korchagin // Energo- i resursoberezheniye – XXI vek.: materialy XII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy internet-konferentsii, 15 marta – 30 iyunya 2014 g., g. Orol / pod redaktsiyey d-ra tekhn. nauk, prof. O.V. Pilipenko, d-ra tekhn. nauk, prof. A.N. Kachanova, d-ra tekhn. nauk, prof. YU.S. Stepanova. – Orol: Gosuniversitet-UNPK, 2014. – S. 162-166.
11. Patent US414996 SSHA. Combined electro magnetic brake and traction increasing device / Ries E.E.; opubl. 12.11.1889.
12. Patent 163519 Rossiyskaya Federatsiya, MPK V61S 15/08, V60L 15/20. Ustroystvo dlya uvelicheniya stsepleniya vedushchikh koles lokomotiva s relsami / Vorobyev V.I., Novikov V.G., Izmerov O.V., Korchagin V.O., Avdashchenko V.S., Mospanova M.YU.; opubl. 20. 07. 2016, Byul. № 20.
13. Patent US2198928 A SSHA. Wehner David E. Electromagnetic traction increaser; opubl. 02.12.1936.
14. A.s. 362722 SSSR. Ustroystvo dlya povysheniya koeffitsiyenta stsepleniya vedushchikh koles lokomotiva s relsami / L.I. Timofeyev; opubl. 1973, Byul. № 3.
15. Patent 2717413, Rossiyskaya Federatsiya, SPK B61C 15/08. Ustroystvo dlya uvelicheniya stsepleniya vedushchikh koles lokomotiva s relsami / Antipin D.YA., Vorobyev V.I., Korchagin V.O., Izmerov O.V., Bondarenko O.I. Opubl. 23.03.2020, byul. № 9.
16. Patent 2717414 Rossiyskaya Federatsiya, SPK B61C 15/08. Ustroystvo dlya uvelicheniya stsepleniya vedushchikh koles lokomotiva s relsami / Antipin D.YA., Vorobyev V.I., Korchagin V.O., Izmerov O.V., Bondarenko O.I.; opubl. 23.03.2020, Byul. № 9.
17. Patent US3307058 A SSHA. Electromagnetic adhesion means for railroad locomotives / Karel Kucera; opubl. 20.01.1964.
18. A. s. 653159 SSSR. Magnitnyy dogruzhatel relsovogo transportnogo sredstva / V.V. Mishin, V.A. Zyabrev, A.I. Lebedev, V.A. Salov, E.M. Shlyakhov; opubl. 30.01.1987, Byul. № 4.
19. Patent US709484 A SSHA. Magnetic wheel / John Otto Heinze Jr.; opubl. 24.02.1902.
20. Patent 2246406 Rossiyskaya Federatsiya, MPK B60B 37/00, B61C 15/04. Kolesnaya para lokomotiva / Ye.V. Slivinskiy, A.A. Zaytsev, S.V. Brovko, Ye.I. Vorobyev; opubl. 20.02.2005, Byul. № 5.
21. Patent 223262 U1 Rossiyskaya Federatsiya, MPK B61C 9/50, B61F 15/16. Tyagovyy privod lokomotiva / S.N. Zlobin, V.I. Vorobyev, O.V. Izmerov [i dr.]; opubl. 09.02.2024.

**Zlobin Sergey Nikolaevich**

Orel State university, Orel  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
of the Department of Mechanical engineering  
E-mail: zsn2@rambler.ru

**Bondarenko Denis Andreevich**

Bryansk State Technical University, Bryansk  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of  
the Department of Railway Rolling Stock  
E-mail: dilekter@gmail.com

**Maslov Maxim Alexandrovich**

Bryansk State Technical University, Bryansk  
Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer at the  
Department of Pipeline Transport Systems  
E-mail: maslovmaksim32@mail.ru

**Volokhov Stanislav Grigorievich**

TMH Engineering LLC, Bryansk  
Candidate of Technical Sciences, Leading Design  
Engineer  
E-mail: aivent@mail.ru

С.Л. КУШНАРЁВ

## НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ

**Аннотация.** Основным способом и средством обеспечения исправности технологических машин и оборудования отечественного производства остаются планово-предупредительная система и метод организации ТО и ремонта силами и средствами потребителей техники. Объемы работ по техническому сервису, которые выполняются ремонтно-техническими предприятиями незначительны и требуют специализированного технологического оборудования.

Несмотря на существование прогрессивного фирменного метода организации технического сервиса, широко применяемого за рубежом, в нашей стране он не применяется. На решение задач повышения эксплуатационной надежности отечественной техники и направлены результаты настоящего исследования.

**Ключевые слова:** надежность, эффективность, работоспособность, фирма, технический сервис.

### Введение

Разносторонний анализ литературных источников, результатов ранее выполненных исследований, обследования отечественной техники, на примере зерноуборочных комбайнов, в ряде регионов Российской Федерации позволяют сформулировать комплекс проблем, на решение которых направлена настоящая работа. Их решение позволит обосновать направления ускоренного инновационного развития российского машиностроения и машинно-технологичных отраслей экономики.

Особенность состояния многих проблем в организации технического сервиса связана с тем, что действовавшая до начала 1990-х годов система технического сервиса прекратила свое существование как обособленная отрасль народного хозяйства. Предприятия технического сервиса оказались без заказов на выполнение работ по ТО и ремонту техники. В результате в настоящее время практически весь объем работ по техническому сервису машин и оборудования в процессе эксплуатации выполняется инженерно-техническими службами потребителей техники. Остаются востребованными только работы, связанные с восстановлением деталей машин и оборудования. Цеха по восстановлению изношенных деталей предприятий технического сервиса дополнительно занимаются изготовлением отдельных деталей на машины и оборудование отечественного и зарубежного производства [1–4].

### Основная часть

Результаты анализа конструкции современных отечественных машин и оборудования, их производственных и технических характеристик, технологических возможностей и других показателей использования по назначению показывают, что российская техника практически не уступает лучшим зарубежным аналогам. А ее применение в конкретных природно-климатических и производственно-экономических условиях, без учета эксплуатационной надежности показывает более высокие показатели эффективности использования по сравнению с зарубежными аналогами. Это относится к машинам и оборудованию многих машинно-технологичных отраслей экономики, включая машиностроение [4–6].

В то же время, необходимо отметить, что низкие показатели надежности российских машин и оборудования значительно снижают показатели производительности и эффективность их использования, ведут к значительным простоям машин и оборудования по техническим причинам и издержкам от потерь продукции, снижению эффективности. Поэтому главной проблемой, решаемой в работе, является повышение надежности отечественных машин и оборудования. По этой причине отечественная техника менее конкурентоспособна и на российском рынке техники, и на мировом. Нынешнее состояние отечественного машиностроения требует быстрого решения проблем импортонезависимости, импортозамещения, диверсификации производства. В то же время решение этого комплекса взаимосвязанных проблем полностью зависит от качественного уровня выпускаемой российской техники.

Поэтому **целью** настоящей научно-исследовательской работы является повышение качества изготовления и показателей эксплуатационной надежности машин и оборудования отечественного производства на всех этапах их жизненного цикла. Достижение поставленной цели способна обеспечить только производственно-технологическая система предприятия или объединения предприятий, которые охватывают все этапы жизненного цикла машин и строят

свою деятельность на перспективных организационно-технологических принципах инновационного развития машиностроительных фирм.

Материалы и методы решения задач организационно-технологических проблем требуют обеспечения высокой степени точности и достоверности результатов на всех этапах работы. В качестве основных методов исследования применялись современные методы сбора, анализ, систематизации и обработки исходной и статистической информации о процессах производства, производственной и технической эксплуатации машин и оборудования, состоянию их надежности и эффективности, восстановления ресурса; исследования и оценки потоков требований на обслуживание; оценки технического состояния и эффективности использования машин и оборудования в условиях реальной эксплуатации при производстве продукции, работ и услуг [6–9, 10].

По результатам исследований, надежность машин и оборудования формируется, практически, на всех этапах их жизненного цикла и, в первую очередь, на этапах проектирования (35 %), конструирования (40 %) и производства (20 %). Таким образом, в сфере эксплуатации обеспечивается только лишь 5 % надежности машин и оборудования. Учитывая разобщенность этих структур, которые представляют современные российские обособленные организации, учреждения и производства, решить проблему повышения качества не представляется возможным. Каждая из них имеет свои цели, задачи и критерии оценки деятельности, не всегда направленные на обеспечение высочайшего уровня качества. Это подтверждается реальным состоянием качественного уровня отечественной техники.

Повышение качественного уровня отечественной техники требует интеграции усилий в этом направлении всех структур, обеспечивающих полный жизненный цикл машин и оборудования, начиная от идеи их создания до утилизации. Главной целью деятельности всех структур должно быть всемерное повышение качества машин и оборудования до (и выше) лучших мировых аналогов.

Данная постановка цели – всемерное повышение качества машин и оборудования на всех этапах жизненного цикла требует реорганизации действующих обособленных организаций, учреждений и производств в единую производственно-технологическую систему – фирму. Особенностью деятельности машиностроительной фирмы является способность обеспечить мировой уровень качества техники в кратчайшие сроки с минимальными производственными издержками. Фирма, охватывая полный технологический цикл от создания техники до ее списания, имеет возможность подчинить деятельность всех структур значительному повышению ее качественного уровня [7–9].

Все структуры, которые необходимы в составе фирмы для обеспечения всех процессов и этапов жизненного цикла машин и оборудования в настоящее время существуют – автономно. Каждая из них имеет свои задачи, функции, критерии оценки деятельности, но не все имеют своей главной целью создание машин и оборудования мирового уровня качества. Фирменная производственно-технологическая система способна объединить и направить усилия всех структур на повышение качества.

Одной из самых важных задач в обеспечении качества, выпускаемых фирмой машин и оборудования, является их инженерно-техническое сопровождение в сфере эксплуатации, у потребителя. Решение этой задачи должно предусматривать не только поставки запасных частей, а непосредственное участие в правильном, квалифицированном использовании машин и оборудования по назначению, их техническом обслуживании и ремонте. Это относится, прежде всего, к обеспечению работоспособности в гарантийный период эксплуатации. Участвуя в этих процессах, технические представители фирмы-производителя смогут контролировать правильность эксплуатации, надежность машин и оборудования, их агрегатов, узлов и деталей; иметь возможность устанавливать истинные причины наступления эксплуатационных отказов; предлагать эффективные способы их устранения в условиях потребителя и исключения при производстве машин и т.д. Технический центр готовит по этим вопросам подробный отчет и направляет подготовленные отчеты с анализом и предложениями в проектные, конструкторские, технологические и производственные структуры. В этих структурах фирмы отчеты тщательно изучаются и принимаются меры для исключения внезапных отказов в процессе эксплуатации машин и оборудования.

Решение задач фирменного инженерно-технического сопровождения (технического сервиса), безусловно, должны обеспечивать структуры (подразделения) фирменной системы технического сервиса. В качестве технических представителей фирмы-производителя могут выступить технические центры фирмы. На них должны быть возложены задачи обеспечения работоспособности и контроля технического состояния при использовании по назначению,

при выполнении плановых профилактических мероприятий и устранении неплановых последствий отказов, имеющих вероятностный характер возникновения. Это требует организации учебных курсов и курсов повышения квалификации эксплуатационного и ремонтно-обслуживающего персонала.

Особую сложность в фирменной производственно-технологической системе представляет обоснование функций, задач, производственно-технологических параметров фирменных центров технического сервиса – технических представителей фирмы-производителя. Безусловно, учитывая размеры страны, федеральных округов и регионов, количество технических представителей фирмы-производителя будет определяться оптимальной зоной обслуживания центра. Определив зону обслуживания технического центра, появляется возможность формирования системы технического сервиса, обоснования функций и параметров фирменных технических центров. В основе определения оптимальной зоны обслуживания должно быть оптимальное распределение всех ремонтно-обслуживающих воздействий между возможными потенциальными структурами-исполнителями. В качестве критерия оптимизации должны быть совокупные издержки, включающие все затраты на выполнение этих ремонтно-обслуживающих воздействий, транспортные расходы, затраты на приобретение средств технического сервиса, а также издержки потребителя от простоев машин и оборудования по техническим причинам. Только учет всех этих издержек позволит правильно, с точки зрения технико-экономической целесообразности, определить место и исполнителя каждого вида ремонтно-обслуживающих воздействий [10–14].

Полученное распределение видов и объемов работ по техническому сервису позволит с высокой степенью достоверности сформировать производственные программы технических центров фирмы и параметры инженерно-технических служб (ИТС) или отделов главного механика (ОГМ) потребителя машин и оборудования.

При определении номенклатуры и объемов работ по техническому сервису необходимо исходить из требований планово-предупредительной системы технического сервиса машин и оборудования и руководящих документов производителя техники. Но они позволяют определить только виды и объемы плановых мероприятий. Для определения видов и объемов неплановых работ, которыми являются неплановые устранения последствий отказов, требуется установить значения наработки на отказы по группам сложности, трудоемкость и продолжительность устранения их последствий. Для этого в реальных производственных условиях необходимо собрать необходимую информацию по эксплуатационной надежности машин и оборудования, обработать ее и получить требуемые значения наработки на отказы по группам сложности, трудоемкости и продолжительности устранения последствий отказов.

Полученная исходная информация позволяет установить виды и объемы работ по техническому сервису и обосновать принципиальную схему системы фирменного технического сервиса машин и оборудования, выпускаемых фирмой. Следующим этапом работы должно быть обоснование функций и структуры фирменной системы технического сервиса, цели и задач фирменного технического центра, его организационной структуры и технического оснащения.

Остро стоит проблема обоснования и выбора наиболее эффективных форм и методов организации технического сервиса машин и оборудования отечественного производства. Их выбор во многом обосновывается результатами, которые будут получены на предшествующих этапах реализации работы. А именно, номенклатурой и объемами работ по техническому сервису, их оптимальным распределением между исполнителями, наличием и состоянием ремонтно-технической базы, полученными параметрами рациональной зоны обслуживания фирменного технического центра, требованиями к качеству технического сервиса и многими другими факторами.

Все приведенные выше проблемы и задачи требуют инновационных решений применительно к перспективной фирменной производственно-технологической системе, имеющей своей главной стратегической целью производство отечественных машин и оборудования наивысшего уровня качества, качества лучших мировых аналогов. Такой подход к решению поставленного комплекса проблем обладает высокой степенью научной новизны, востребован современными требованиями потребителей к качеству техники и, в первую очередь, к ее эксплуатационной надежности.

Проведенные результаты анализа состояния машиностроительного производства и качества выпускаемой техники указывают на острую необходимость повышения качества российской техники и, в первую очередь, показателей надежности. При этом, и в сфере

машиностроения, и в сфере эксплуатации машин и оборудования, их технического сервиса имеются значительные научные достижения и огромный практический положительный опыт. Разработаны перспективные технологии и технические средства для изготовления деталей, узлов и агрегатов машин и оборудования высокого качества, с повышенным ресурсом. Ежегодно в стране регистрируется значительное количество изобретений и патентов. Именно эти разработки лежат в основе повышения качества выпускаемой техники. Но на действующих производственных и обслуживающих предприятиях техники они практически не находят применения. В результате уровень качества российской техники остается неизменным с середины 80-х годов прошлого столетия. И он не повышается даже несмотря на то, что российские потребители техники, опробовав зарубежные машины и оборудование, отдают предпочтение им, несмотря на то, что их стоимость 5–10 и более раз выше российских аналогов [14–16].

Основная причина в незаинтересованности заводов-изготовителей в повышении качества техники кроется в устаревшей системе производства и игнорировании прав и требований потребителей. В результате спрос на технику массового применения снизился с нескольких сот тысяч до нескольких тысяч штук в год. Значительная часть техники, машин и оборудования приобреталась у зарубежных поставщиков. В условиях санкций необходимо развивать собственное российское производство техники с уровнем качества не ниже лучших зарубежных аналогов.

Производство высококачественной отечественной техники требует должного научно-технического обоснования перспективных направлений развития техники и технологий, а также ускоренной их практической реализации на всех этапах жизненного цикла машин и оборудования. Мировой опыт показывает, что только реорганизация существующей системы производства техники может обеспечить решение главной проблемы – повышения качества машин и оборудования. Как показывают результаты исследований, стоящие проблемы могут быть решены только созданием фирменной производственно-технологической системы.

Поэтому целью настоящего исследования является повышение качества (и в первую очередь, надежности) отечественных машин и оборудования на основе разработки и внедрения фирменной производственно-технологической системы, объединяющей усилия всех структур фирмы на всех этапах жизненного цикла машины.

Достижение поставленной цели исследования требует научно-методического обеспечения решения следующих нижеприведенных задач:

- исследование проблем состояния качества (надежности) российской техники, причин низкой надежности машин и оборудования, обоснование направлений повышения надежности и эффективности машин и оборудования отечественного производства;
- обоснование требований к качеству, надежности и эффективности, современной отечественной техники
- исследование условий и факторов формирования качества (надежности) машин и оборудования российского производства;
- исследование и совершенствование системы технического сервиса машин и оборудования;
- исследование состояния и параметров эксплуатационной надежности машин и оборудования российского производства (на примере зерноуборочных комбайнов ПАО «Ростсельмаш»);
- оптимизация распределения работ и услуг технического сервиса между структурами-исполнителями, формирование системы фирменных технических центров и обоснование их функций и задач;
- определение номенклатуры и объемов работ и услуг, выполняемых различными структурами-исполнителями и формирование их производственных программ и параметров;
- определение зон обслуживания фирменных технических центров и их территориального расположения;
- разработка принципиальных основ организации фирменного технического сервиса машин и оборудования;
- технико-экономическая оценка внедрения результатов исследования.

При решении поставленных в работе проблем и задач необходимо исходить из того, что разработанное ранее научно-методическое обеспечение проектирования систем технического сервиса машин и оборудования требует принципиальной переработки в направлении учета требований потребителя. Потребитель приобретает технику не для ее



постоянного обслуживания и ремонта, а как средство производства продукции, работ и услуг жизненно важных для производства и общества [16–18].

### **Заключение**

Приведенные результаты исследования по повышению эксплуатационной надежности технологических машин и оборудования позволяют сформулировать следующие выводы и предложения.

1. Обеспечить повышение эксплуатационной надежности отечественных машин и оборудования до уровня лучших мировых аналогов и выше возможно только при радикальной реорганизации существующих обособленных заводов-изготовителей, учреждений и организаций в мощные фирменные производственно-технологические системы – машиностроительные фирмы.

2. Целевыми ориентирами каждого структурного подразделения (предприятия) машиностроительной фирмы на всех этапах жизненного цикла машины должно стать повышение качества техники, ее эксплуатационной надежности.

3. Для обеспечения контроля и управления работоспособностью выпускаемой техники, а также сбора и обработки информации об эксплуатационной надежности машин должно быть организовано фирменное инженерно-техническое сопровождение (технический сервис) продукции машиностроения.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Планово-предупредительная система ТО и ремонта машин и оборудования. М.: Машиностроение, 2001. – 369 с.
2. Комплексная система ТО и ремонта машин в сельском хозяйстве. М.: ГОСНИТИ, 1985. – 143с.
3. Техническая эксплуатация сельскохозяйственных машин (с нормативными материалами). – М.: ГОСНИТИ, 1993.
4. Черноиванов В.И., Северный А.Э., Кричевский М.Е. и др. Проблемы технического сервиса в АПК России (монография). М.: ГОСНИТИ, 2000.– 309 с.
5. Кушнарёв Л.И., Чепурина Е.Л., Чепурин А.В., Кушнарёв С.Л. Качество и надежность отечественной техники – основа ее конкурентоспособности //Тракторы и сельхозмашины. – 2015. – № 11. С. 35-37.
6. Шакамаев Р.Р., Старунов А.В. Анализ системы технического сервиса сельскохозяйственной техники в Германии //Наука: научно-производственный журнал. 2020. № 4. С. 104-108.
7. Кушнарёв Л.И., Чепурина Е.Л., Кушнарёв С.Л., Чепурин А.В., Корнеев В.М. Модернизация системы технического сервиса агропромышленного комплекса / Монография. Под редакцией Л.И. Кушнарева. М.: МЭСХ. – 2015. – 440 с.
8. Брче М.А., Омельченко И.Н., Шааб А. Устойчивое развитие: механизмы реализации. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. 172 с.
9. Кушнарёв Л.И. Повышение качества машин и оборудования на основе фирменного технического сервиса// Технический сервис машин. 2023. № 3 (152). С. 46-50
10. Журавлев С.Ю. Организация и технология технического сервиса сельскохозяйственной техники нового поколения //Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2022. № 7 (213). С. 116-122.
11. Голубев И.Г., Быков В.В., Митракова В.Д., Ермолин Н.В. Организация и развитие фирменного технического сервиса машин и оборудования для АПК. Москва, 2000.
12. Кушнарёв Л.И. Фирменный технический сервис машин и оборудования. Проблемы. Поиски. Решения /Монография. Saarbrücken, Deutschland. Palmarium. Academic publishing–2014.–210 с.
13. Кушнарёв Л.И. К проблеме импортозамещения и конкурентоспособности техники. Труды ГОСНИТИ, том 123 ч. 1. М: ГОСНИТИ 2016. – С. 79–85.
14. Кушнарёв С.Л. Принципы организации фирменного обслуживания сельскохозяйственной техники// Ремонт, восстановление. Модернизация. – 2004. – №1. – С. 35-37
15. Чепурина Е.Л. Кушнарева Д.Л. Повышение безотказности машин и оборудования в животноводстве//Эффективное животноводство. – 2018. – № 7(146). – С. 49-51.
16. Кушнарёв С.Л., Чепурина Е.Л. Чепурин А.В. К обоснованию создания фирменной системы инженерно-технического сервиса машин и оборудования //Международный технико-экономический журнал. 2019. № 2. С. 41-47.
17. Чепурина Е.Л., Кушнарева Д.Л. Основы методики проектирования систем технического сервиса (статья) //Технический сервис машин. – 2019. – № 3(136). – С. 73-80.
18. Кушнарёв Л.И. К организации фирменного технического сервиса машин и оборудования //Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2024. № 3. С. 8-14.

**Кушнарёв Сергей Леонидович**

ФГБОУ ВО МГТУ имени Н.Э. Баумана, г. Москва

Доцент кафедры основы конструирования машин

105005 Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

E-mail: serg-leo@mail.ru

S.L. KUSHNAREV

## DIRECTIONS FOR INCREASING THE OPERATIONAL RELIABILITY OF MACHINERY AND EQUIPMENT

**Abstract.** *The main method and means of ensuring the serviceability of technological machines and equipment of domestic production remains the planned preventive system and the method of organizing maintenance and repair by the forces and means of equipment consumers. The volume of technical service work performed by repair and technical enterprises is insignificant and requires specialized technological equipment. Despite the existence of a progressive proprietary method of organizing technical service, widely used abroad, it is not used in our country. The results of this study are aimed at solving the problems of increasing the operational reliability of domestic equipment.*

**Keywords:** *reliability, efficiency, performance, company, technical service.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Scheduled preventive system for maintenance and repair of machinery and equipment. M.: Mechanical Engineering, 2001. – 369 p.
2. A comprehensive system of maintenance and repair of machines in agriculture. M.: GOSNITI, 1985. – 143 p.
3. Technical operation of agricultural machines (with regulatory materials). – M.: GOSNITI, 1993.
4. Chernoiyanov V.I., Severny A.E., Krichevsky M.E. and others. Problems of technical service in the agro-industrial complex of Russia (monograph). M.: GOSNITI, 2000. – 309 p.
5. Kushnarev L.I., Chepurina E.L., Chepurin A.V., Kushnarev S.L. The quality and reliability of domestic equipment is the basis of its competitiveness // Tractors and agricultural machinery. – 2015. – No. 11. P. 35-37.
6. Shakamatov R.R., Starunov A.V. Analysis of the technical service system for agricultural machinery in Germany // Science: scientific and production journal. 2020. No. 4. pp. 104-108.
7. Kushnarev L.I., Chepurina E.L., Kushnarev S.L., Chepurin A.V., Korneev V.M. Modernization of the technical service system of the agro-industrial complex / Monograph. Edited by L.I. Kushnareva. M.: MESH. – 2015. – 440 p.
8. Brche M.A., Omelchenko I.N., Shaab A. Sustainable development: mechanisms of implementation. M.: Publishing house of MSTU im. N.E. Bauman, 2020. 172 p.
9. Kushnarev L.I. Improving the quality of machines and equipment based on branded technical service // Technical service of machines. 2023. No. 3 (152). pp. 46-50
10. Zhuravlev S.Yu. Organization and technology of technical service of new generation agricultural machinery // Bulletin of the Altai State Agrarian University. 2022. No. 7 (213). pp. 116-122.
11. Golubev I.G., Bykov V.V., Mitrakova V.D., Ermolin N.V. Organization and development of branded technical service for machines and equipment for the agro-industrial complex. Moscow, 2000.
12. Kushnarev L.I. Branded technical service of machines and equipment. Problems. Search. Solutions / Monograph. Saarbrücken, Germany. Palmarium. Academic publishing–2014.–210 p.
13. Kushnarev L.I. On the problem of import substitution and competitiveness of technology. Proceedings of GOSNITI, volume 123 part 1. M: GOSNITI 2016. – pp. 79–85.
14. Kushnarev S.L. Principles of organizing corporate maintenance of agricultural machinery // Repair, restoration, modernization. – 2004. – No. 1. – pp. 35-37
15. Chepurina E.L., Kushnareva D.L. Increasing the reliability of machinery and equipment in animal husbandry // Effective animal husbandry. – 2018. – No. 7(146). – pp. 49-51.
16. Kushnarev S.L., Chepurina E.L., Chepurin A.V. To justify the creation of a proprietary system of engineering and technical service of machines and equipment // International Technical and Economic Journal. 2019. No. 2. P. 41-47.
17. Chepurina E.L., Kushnareva D.L. Fundamentals of the design methodology for technical service systems (article) // Technical service of machines. – 2019. – No. 3(136). – P. 73-80.
18. Kushnarev L.I. To the organization of branded technical service of machines and equipment // Repair. Recovery. Modernization. 2024. No. 3. P. 8-14.

**Kushnarev Sergey Leonidovich**

The Bauman Moscow State Technical University

Associate Professor of the Department of Fundamentals of

Machine Design

105005 Moscow, 2nd Baumanskaya st., 5, building 1

E-mail: serg-leo@mail.ru

© С.Л. Кушнарёв, 2024

НГУЕН ТХАЙ ХА

## ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛЕЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ДАВЛЕНИЙ В РАДИАЛЬНО-УПОРНЫХ ПОДШИПНИКАХ ЖИДКОСТНОГО СКОЛЬЖЕНИЯ

**Аннотация.** В работе представлен новый гибридный конико-цилиндрический гидродинамический подшипник жидкостного трения. Была разработана математическая модель гибридного подшипника на базе уравнения Рейнольдса, полученного в цилиндрических координатах. Были проведены расчеты полей давления в стационарной изотермической постановке для уточнения условий взаимодействия и граничных условий при напорно-сдвиговых течениях смазки. Полученные результаты свидетельствуют о значительной зависимости уровня давлений в смазочном слое от величины скорости вращения, радиального зазора и эксцентриситета.

**Ключевые слова:** радиально-упорные подшипники жидкостного трения, поля давлений в смазочном слое, структурные и рабочие параметры, математическая и алгоритмическая модель, максимальные давления, метод конечных разностей.

### Введение

На рабочие элементы роторных агрегатов зачастую действуют как радиальные, так и осевые силы, в результате чего опоры роторов должны воспринимать одновременно осевые и радиальные нагрузки (высокоскоростные роторные машины, насосы, компрессоры и др.). Использование комбинации двух подшипников (радиального и упорного) является наиболее распространенным техническим решением применяем в данных роторных агрегатах. Однако использование пары подшипников ведет к увеличению массогабаритных характеристик таких машин. В результате с точки зрения удобства компоновки, минимизации габаритных размеров, улучшения динамических и энергетических характеристик, а также потенциальной возможности управления движением ротора рационально применение гибридных конико-цилиндрических опор скольжения [1]. Принцип действия гидродинамических подшипников жидкостного трения состоит в том, что рабочая смазывающая жидкость раскручиваясь внутри подшипника, создает эффект подъёмной, центробежной силы, данный эффект может создаваться также за счет вязкостного клина или температурного [2].

В данной работе представлены математическая модель, алгоритм, а также результаты расчета полей давления на основе метода конечных разностей (МКР [3,4]) для гибридного конико-цилиндрического подшипника жидкостного трения. Расчет полей давления предложенной математической моделью, которая базируется на решении уравнения Рейнольдса, станет основой для дальнейшего расчета динамических характеристик подшипника, таких как несущая способность, момент трения, расход.

### Математическая модель расчета поля давления

Рассматривается математическая модель гибридного конико-цилиндрического гидродинамического подшипника жидкостного трения. Структурная схема подшипника представлена на рисунке 1.

Данная математическая модель базируется на модифицированном уравнении Рейнольдса, которое получается путем совместного решения уравнения движения жидкости и уравнения неразрывности среды.

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = \nabla \cdot T_{\sigma} + \rho \vec{f}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0. \quad (2)$$

В результате совместного решения уравнений (1) и (2) в цилиндрических координатах, с учетом пренебрежения радиальной составляющей скорости движения, а также массовыми силами и силами инерции, некоторыми составляющими вязких сил, получаем модифицированное уравнение Рейнольдса для конико-цилиндрического гидродинамического подшипника жидкостного трения [6]:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( r h^3 \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \alpha} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial \varphi} \right) = 6 \omega \mu \frac{\partial h}{\partial \varphi} \quad (3)$$

где  $r$  – радиальная координата;  
 $\varphi$  – угловая координата;  
 $h$  – значение зазора смазочного слоя;  
 $\alpha$  – угол конусности;  
 $\omega$  – угловая скорость;  
 $\mu$  – динамическая вязкость смазочного вещества;  
 $p$  – давление жидкости.

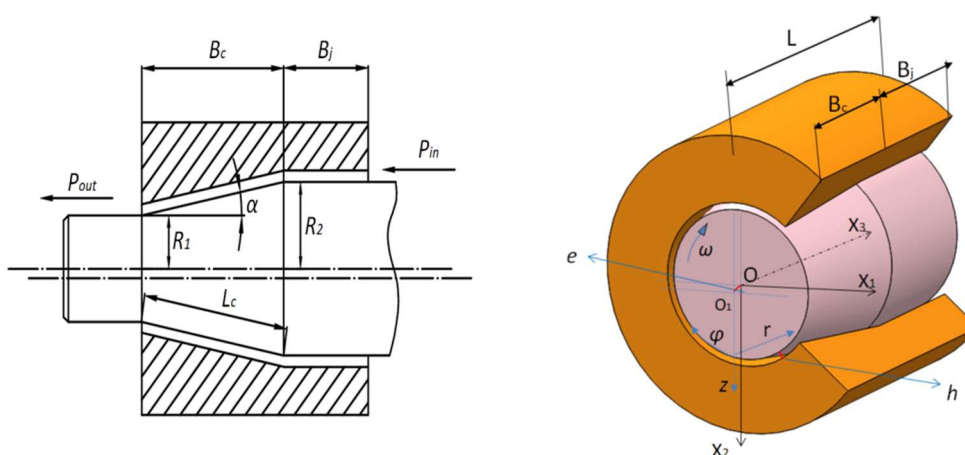


Рисунок 1 – Структурная схема гибридного конико-цилиндрического гидродинамического подшипника жидкостного трения

Функция зазора для данного вида подшипников принимает следующий вид, и может быть применена как для цилиндрической части, так и для конической с учетом того, что угол конусности в цилиндрической части подшипника стремится к нулю [6]:

$$h = h_0 (1 - \varepsilon \cos \beta) \cos \alpha \quad (4)$$

#### Численное решение уравнения Рейнольдса

Для решения уравнения Рейнольдса в качестве численного метода был выбран метод конечных разностей. Для этого уравнение Рейнольдса в частных производных должно быть представлено в разностном виде в соответствии с выбранной расчетной сеткой (рисунок 2) и приведено к виду:

$$A_{i,j} p_{c_{i,j}} + B_{i,j} p_{c_{i+1,j}} + C_{i,j} p_{c_{i-1,j}} + D_{i,j} p_{c_{i,j+1}} + E_{i,j} p_{c_{i,j-1}} = F_{i,j} \quad (5)$$

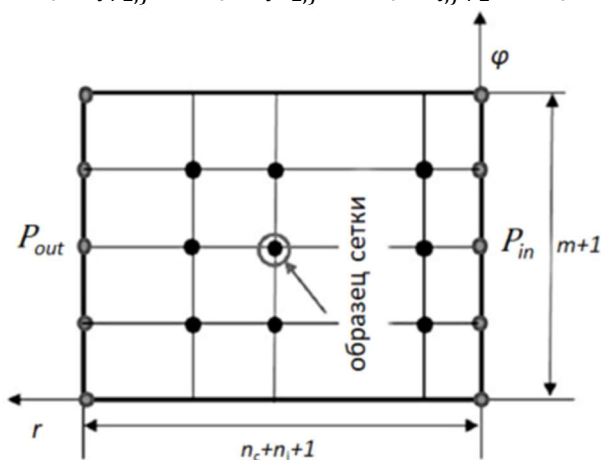


Рисунок 2 – Расчетная конечно-разностная сетка гибридного подшипника жидкостного трения

С учетом перехода к конечно-разностной сетке уравнение Рейнольдса примет следующий вид:

$$\frac{1}{(\Delta r)^2} \left( r_{i+\frac{1}{2}j} h_{c_{i+\frac{1}{2}j}}^3 p_{c_{i+1,j}} + r_{i-\frac{1}{2}j} h_{c_{i-\frac{1}{2}j}}^3 p_{c_{i-1,j}} - \left( r_{i+\frac{1}{2}j} h_{c_{i+\frac{1}{2}j}}^3 + r_{i-\frac{1}{2}j} h_{c_{i-\frac{1}{2}j}}^3 \right) p_{c_{i,j}} \right) +$$

$$\frac{1}{r^2 \sin^2 \alpha (\Delta \varphi)^2} \left( r_{i,j+\frac{1}{2}} h_{c_{i,j+\frac{1}{2}}}^3 p_{c_{i,j+1}} + r_{i,j-\frac{1}{2}} h_{c_{i,j-\frac{1}{2}}}^3 p_{c_{i,j-1}} - \left( r_{i,j+\frac{1}{2}} h_{c_{i,j+\frac{1}{2}}}^3 + r_{i,j-\frac{1}{2}} h_{c_{i,j-\frac{1}{2}}}^3 \right) p_{c_{i,j}} \right) =$$

$$6\omega\mu \frac{h_{c_{i,j+\frac{1}{2}}}^3 - h_{c_{i,j-\frac{1}{2}}}^3}{\Delta \varphi} \quad (6)$$

где  $\Delta \varphi = \frac{2\pi \sin \alpha}{m}$ .

Затем в уравнение разностного вида приводятся подобные и выделяются коэффициенты дискретного уравнения:

$$A_{ij} = \frac{1}{\lambda_{ij}^2} h_{c_{i+\frac{1}{2}j}}^3 = \frac{1}{r^2 \sin^2 \alpha} r_{i+\frac{1}{2}j} h_{c_{i+\frac{1}{2}j}}^3$$

$$B_{ij} = \frac{1}{\lambda_{ij}^2} h_{c_{i-\frac{1}{2}j}}^3 = \frac{1}{r^2 \sin^2 \alpha} r_{i-\frac{1}{2}j} h_{c_{i-\frac{1}{2}j}}^3$$

$$C_{ij} = \left( \frac{\Delta \varphi}{\Delta \lambda} \right)^2 h_{c_{i,j+\frac{1}{2}}}^3 = \left( \frac{\Delta \varphi}{\Delta r} \right)^2 r_{i,j+\frac{1}{2}} h_{c_{i,j+\frac{1}{2}}}^3$$

$$D_{ij} = \left( \frac{\Delta \varphi}{\Delta \lambda} \right)^2 h_{c_{i,j-\frac{1}{2}}}^3 = \left( \frac{\Delta \varphi}{\Delta r} \right)^2 r_{i,j-\frac{1}{2}} h_{c_{i,j-\frac{1}{2}}}^3$$

$$E_{ij} = A_{ij} + B_{ij} + C_{ij} + D_{ij}$$

$$F_{ij} = \frac{6\omega\mu}{\Delta \varphi} \left( h_{c_{i+\frac{1}{2}j}}^3 - h_{c_{i-\frac{1}{2}j}}^3 \right)$$

Таблица 1 – Геометрические и рабочие параметры подшипника

Параметры			Гибритный	
			Конический	Цилидрический
$L$	Длина подшипника	(мм)	37	37
$R$	Радиус	(мм)	30	$R_1=24$ и $R_2=30$
$\mu$	Вязкость смазки	(Па.с)	0,0003	
$\varepsilon$	Эксцентриситет	(-)	0,2....0,6	
$n$	Частота ротора	(об/мин)	5000...15000	
$h_0$	Начальный зазор	(мкм)	40...120	
$P_{in}$	Давление питания	(Па)	$1.05 \cdot 10^5$	
$P_{out}$	Давление окружающего среды	(Па)	$1 \cdot 10^5$	
$j, c$	индекс цилиндрической конической части	(-)	(-)	

### Программная модель

Модель гидродинамического конико-цилиндрического подшипника жидкостного трения была реализована в программном комплексе MATLAB. С учетом полученных конечно-разностных коэффициентов, которые использовались для решения системы линейных арифметических уравнений, с учетом граничных условий: давление подачи и слива жидкости известны, начало развертки и конец связаны, температура смазочной жидкости и вязкость постоянны.

Согласно структурной схемы подшипника (рисунок 1) смазка подается из камеры высокого давления  $P_{in}$  на цилиндрическом участке и сливается под действием атмосферного давления на выходе из конической части гибридного подшипника  $P_{out}$ . Значения давления, указанные на входе и выходе, будут определять граничные условия при расчете. Параметры моделируемого гидродинамического гибридного подшипника представлены в таблице 1.

### Верификация модели гидродинамического конико-цилиндрического подшипника жидкостного трения

Верификация разработанной модели гибридного конико-цилиндрического подшипника жидкостного трения проводилась на основе исследований других авторов. Результаты моделирования конического сечения предложенным методом сравнивались с результатами В.М. Хэннон и М.Дж. Браун [10]. Сравнение производилось для подшипника

при следующих параметрах:  $R_1=70$  мм,  $R_2=76$  мм,  $L=51$  мм,  $\varepsilon=0.7$ ,  $h_0=76$  мкм,  $n=10000$  об/мин. Результаты верификации конического участка представлены на рисунке 3.

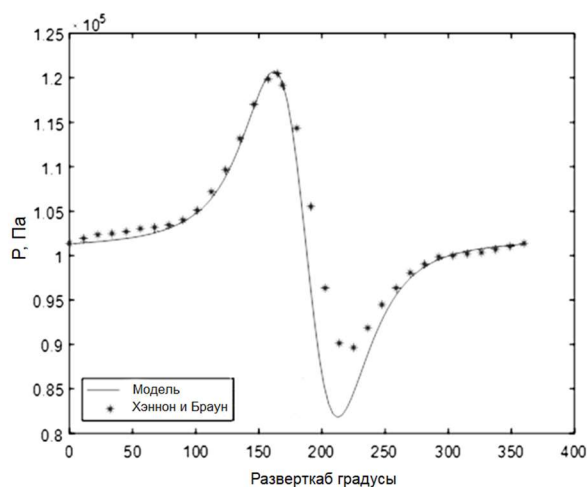


Рисунок 3 – Результаты верификации конического участка

Результаты моделирования цилиндрического участка сравнивались с результатами представленными Касаи и коллегами в работе [11]. Сравнение проводилось для цилиндрического гидродинамического подшипника со следующими параметрами:  $R=60$  мм,  $L=74$  мм,  $\varepsilon=0.7$ ,  $h_0=100$  мкм,  $n=5000$  об/мин. Результаты сравнения для цилиндрической части представлены на рисунке 4.

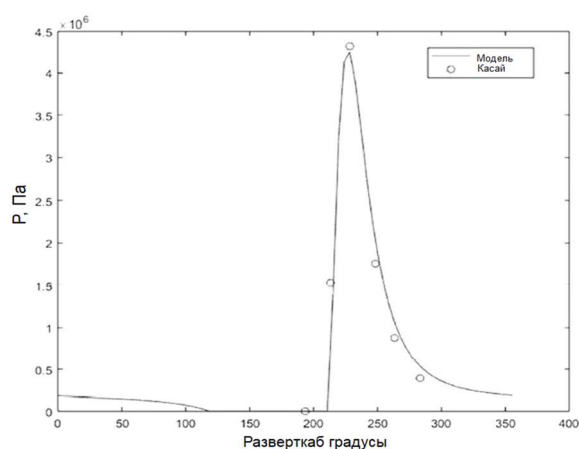
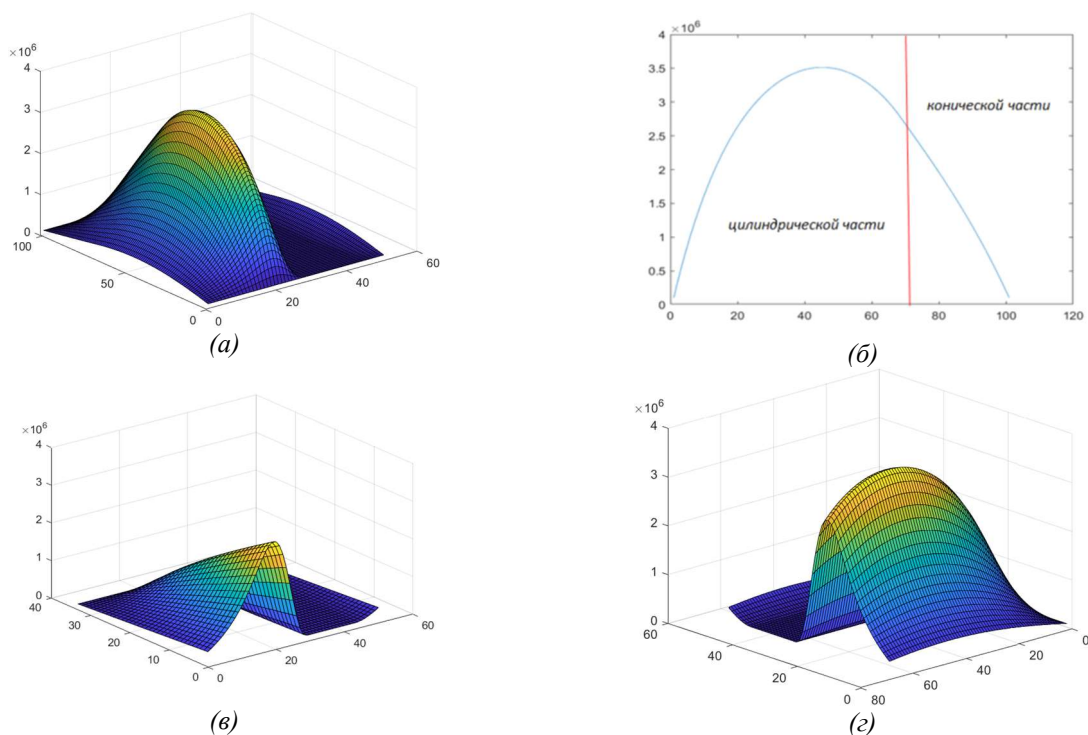


Рисунок 4 – Результаты верификации цилиндрического участка

Результаты сравнения математической модели с другими работами показывают хорошую сходимость в том числе и с экспериментальными данными. Погрешность работы математической модели составила не более 2% для цилиндрической части и не более 6% в диффузионной части конического участка.

### Результаты моделирования

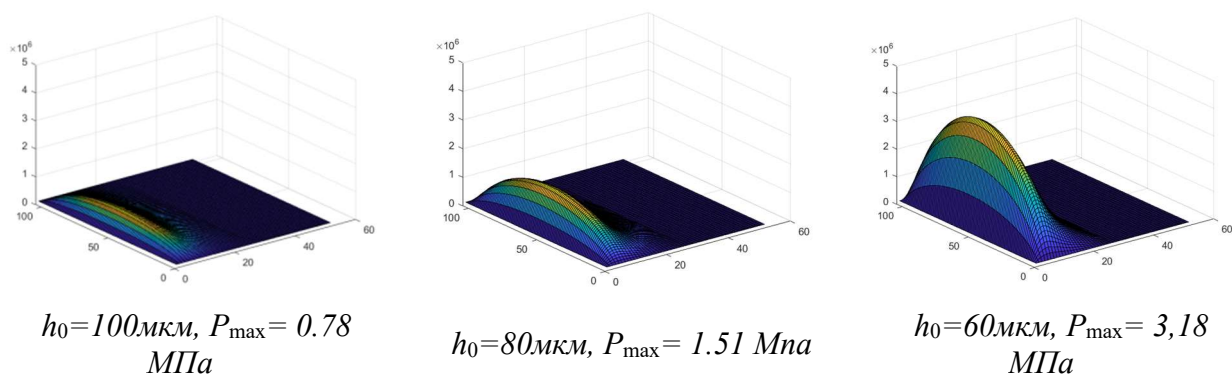
Точный расчет полей давлений в смазочных слоях является необходимым условием при расчете энергетических и динамических характеристик подшипников жидкостного трения. В данной работе расчеты полей давления выполняются с рабочими и геометрическими параметрами подшипника указанными в таблице 1. Моделирование производится для гибридного конико-цилиндрического подшипника жидкостного трения. На рисунке 5 представлены результаты расчета полей давления для значения эксцентриситета  $\varepsilon=0.7$ .



**Рисунок 5 – Результат расчета полей давления в программном комплексе:**  
 (а) поле давления гибридного подшипника, (б) сечение моля давления для всего подшипника,  
 (в) поле давления конической части, (г) поле давления цилиндрической части

Результаты расчета полей давления гибридного подшипника представленные на рисунке 5 показывают, что максимальное давление цилиндрической части почти на 70% превышает максимальное давление конической части. Сильный вклад в разницу пикового давления двух частей вносит разница между размерами конической и цилиндрической частей. Ширина цилиндрической части в два раза больше, чем конической части. Также стоит отметить, что давление в цилиндрической части возрастает быстрее чем в конической, а его пик смещен в сторону конического подшипника.

Как известно, поле давления зависит от многих факторов, в том числе от начального зазора; скорости вращения вала, эксцентриситета. В результате были проведены расчеты максимального значения давления создаваемого в опоре от этих параметров. Результаты представлены на рисунке 6-9.



**Рисунок 6 – Поля давлений гибридного подшипника  $\varepsilon = 0.6$ ,  $n = 10000$  (об/мин)**



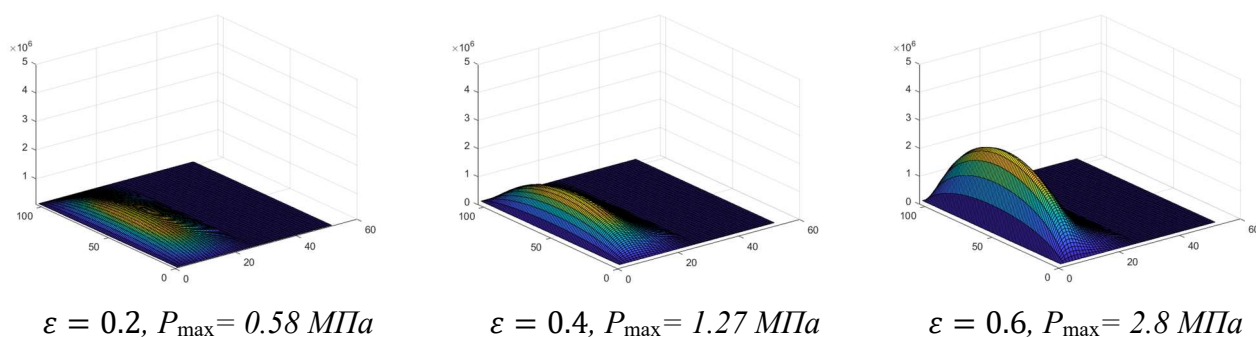


Рисунок 7 – Поля давлений гибридного подшипника  $h_0=60\text{мкм}$   $n = 10000(\text{об/мин})$

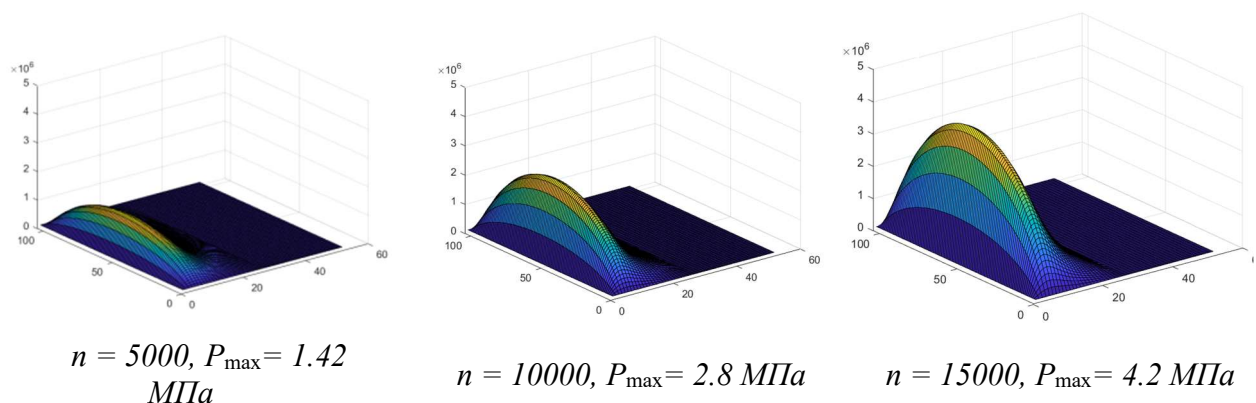


Рисунок 8 – Поля давлений гибридного подшипника  $h_0=60\text{мкм}$ ,  $\varepsilon = 0,6$

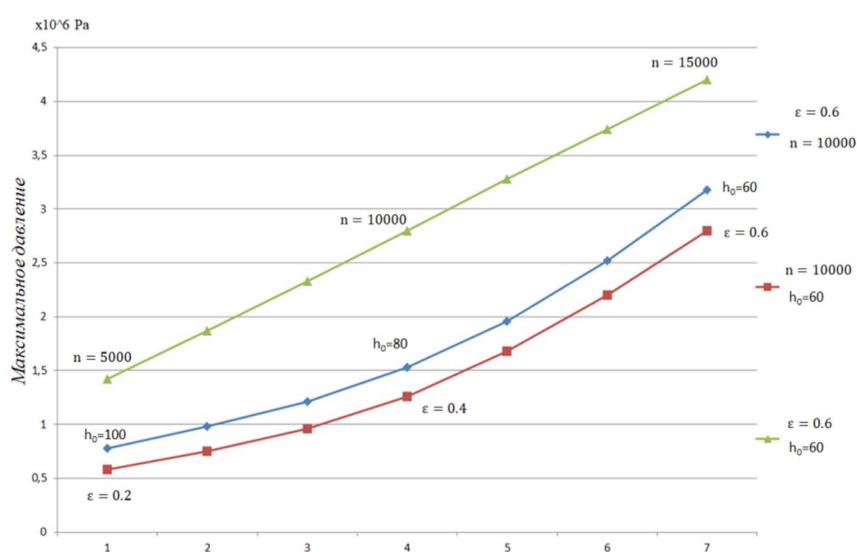


Рисунок 9 – Максимальное давление гибридного подшипника с различными параметрами

Результаты представленные на рисунках 6-9 показывают, что с увеличением скорости вращения вала и эксцентриситета значение максимального давления возрастает. Также тенденция увеличения максимального значения давления видна при уменьшении значения среднего радиального зазора. Стоит отметить, что значение максимального давления в зависимости от скорости вращения имеет линейный характер, в то время как зависимости от эксцентриситета и значения зазора являются нелинейными и имеют экспоненциальный характер.

#### Заключение

В работе представлен новый гибридный конико-цилиндрический гидродинамический подшипник жидкостного трения. Было получено модифицированное уравнение Рейнольдса,

которое может быть применено как для конической так и для цилиндрической частей, в том числе и их комбинаций. На основе полученного уравнения была разработана математическая модель гибридного подшипника в программном комплексе MATLAB. Были проведены расчеты полей давления в стационарной изотермической постановке для уточнения условий взаимодействия и граничных условий при напорно-сдвиговых течениях смазки. Полученные результаты свидетельствуют о значительной зависимости уровня давлений в смазочном слое от величины скорости вращения, радиального зазора и эксцентриситета. Также стоит отметить, что давление в цилиндрической части возрастает быстрее чем в конической, а его пик максимального давления в гибридной опоре смещен в сторону конического подшипника, а не находится в центре цилиндрической части.

Дальнейшие исследования данных опор предполагают разработку более широкого комплекса математических и программных моделей, включающих в себя расчет динамических и энергетических характеристик гибридных опор. В том числе и исследование гидростатических гибридных конико-цилиндрических опор. Стоит отметить, что предварительный инженерный анализ свидетельствует о перспективах использования данного типа опор для создания радиально-осевых подшипников с активным управлением с целью повышения стабильности движения ротора.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марахин Н.А., Нгуен Тхай Ха, Лю Ифань, Казаков Ю.Н., Савин Л.А. Гибридные Подшипники Жидкостного Трения // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*, 2023, № 6 (362), С. 35.
2. Савин, Л.А. Моделирование роторных систем с опорами жидкостного трения: монография / Л.А. Савин, О.В. Соломин // М.: Машиностроение–1, 2006. – С. 444
3. Korneev A.Yu. Steady Characteristics of the Water-Lubricated Conical Bearings / S.B. Li, H.R. Ao, H.Y. Jiang, A.Yu. Korneev, L.A. Savin // *Journal of Donghua University*, 2012, T. 29(2), С. 115 – 122.
4. Yuri N. Kazakov, Alexey V. Korneev, Denis V. Shutin, Shengbo Li, Leonid A. Savin Active Fluid-Film Bearing With Deep Q-Network Agent-Based Control System // *Journal of Tribology*, 2022, T. 144, №8. <https://doi.org/10.1115/1.4053776>
5. А.В. Корнаев, Ю.Н. Казаков Подшипник скольжения с изменяемой геометрией зазора: расчет гидродинамических сил // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*, 2021, № 5 (349), С. 74-82. DOI: 10.33979/2073-7408-2021-349-5-74-82.
6. Кочин, Н.Е. Векторное исчисление и начала тензорного исчисления // Н.Е. Кочин. – М.: Наука, 1965. – 424 с.
7. Корнеев, А.Ю. Динамические и интегральные характеристики конических подшипников скольжения: 15.13.18 / УДК 621.822.5:532.516.5
8. Никитин, А.К. Гидродинамическая теория смазки и расчет подшипников скольжения, работающих в стационарном режиме / А.К. Никитин [и др.] // М.: Наука, 1981 - 316 с.
9. Ильин, В.А. и др. Математический анализ. Начальный курс / В.А. Ильин, В.А. Садовничий, Бл. Х. Сендов // Под ред. А.Н. Тихонова. -2 е изд., перераб: Изд – во МГУ, 1985. – 662 с.
10. Denis Shutin, Yuri Kazakov, Ivan Stebakov, Leonid Savin Data-driven and physics-informed approaches for improving the performance of dynamic models of fluid film bearings // *Tribology International*, 2024, T. 191. DOI: 10.1016/j.triboint.2023.109136.
11. W.M. Hannon and M.J. Braun Numerical Solution of a Fully Thermally Coupled Generalized Universal Reynolds Equation (GURE) and its Application. Part 1: Conical Bearing // *Tribology Transactions*, 2007, T. 50, № 4, С. 540–557. doi:10.1080/10402000701631742 (2007).
12. Kasai M, Fillon M, Bouyer J, Jarny S. Influence of lubricants on plain bearing performance: evaluation of bearing performance with polymer-containing oils // *Tribol. Int.*, 2012, T. 46, № 1. <https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2011.03.009>.

#### **Нгуен Тхай Ха**

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

NGUYEN THAI HA

## EFFECT OF STRUCTURAL PARAMETERS ON THE FORMATION OF HYDYNAMIC PRESSURE FIELD IN CYLINDRICAL-CONIAL FLUID BEARINGS

**Abstract.** *This paper presents a new hybrid conical-cylindrical hydrodynamic fluid friction bearing. A mathematical model of a hybrid bearing was developed based on the Reynolds equation obtained in cylindrical coordinates. Calculations of pressure fields were carried out in a stationary isothermal formulation to clarify the interaction conditions and boundary conditions for pressure-shear lubricant flows. The results obtained indicate a significant dependence of the pressure level in the lubricating layer on the rotation speed, radial clearance and eccentricity.*

**Keywords:** *fluid friction bearings, hydrodynamic effects, pressure fields in the lubricating layer, structural and operating parameters, mathematical and algorithmic model, maximum pressures, finite difference method.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Marakhin, N.A., Nguyen Thai Ha, Liu Yifan, Kazakov Yu.N., Savin L.A. Hybrid Fluid Friction Bearings // Fundamental and applied problems of engineering and technology, 2023, No. 6 (362), pp. 35.
2. Savin, L.A. Modeling of rotor systems with fluid friction supports: monograph / L.A. Savin, O.V. Solomin // M.: Mashinostroenie-1, 2006. – pp. 444
3. Korneev, A.Yu. Steady Characteristics of the Water-Lubricated Conical Bearings / S.B. Li, H.R. Ao, H.Y. Jiang, A.Yu. Korneev, L.A. Savin // Journal of Donghua University, 2012, Vol. 29(2), pp. 115 – 122.
4. Yuri N. Kazakov, Alexey V. Kornaev, Denis V. Shutin, Shengbo Li, Leonid A. Savin Active Fluid-Film Bearing With Deep Q-Network Agent-Based Control System // Journal of Tribology, 2022, Vol. 144, No. 8. <https://doi.org/10.1115/1.4053776>
5. A.V. Kornaev, Yu.N. Kazakov Sliding bearing with variable clearance geometry: calculation of hydrodynamic forces // Fundamental and applied problems of engineering and technology, 2021, Vol. 5 (349), pp. 74-82. DOI: 10.33979/2073-7408-2021-349-5-74-82.
6. Kochin, N.E. Vector calculus and the beginnings of tensor calculus // N.E. Kochin. – M.: Nauka, 1965. – 424 pp.
7. Korneev, A.Yu. Dynamic and integral characteristics of tapered plain bearings: 13.15.18 / UDC 621.822.5:532.516.5
8. Nikitin, A.K. Hydrodynamic theory of lubrication and calculation of sliding bearings operating in stationary mode / A.K. Nikitin [etc.] // M.: Nauka, 1981 - 316 pp.
9. Ilyin, V.A. and others. Mathematical analysis. Initial course / V.A. Ilyin, V.A. Sadovnichy, Bl. H. Sendov // Ed. A.N. Tikhonov. -2nd ed., revised: Publishing house of Moscow State University, 1985. – 662 pp.
10. Denis Shutin, Yuri Kazakov, Ivan Stebakov, Leonid Savin Data-driven and physics-informed approaches for improving the performance of dynamic models of fluid film bearings // Tribology International, 2024, Vol. 191. DOI: 10.1016/j.triboint.2023.109136.
11. W.M. Hannon and M.J. Braun Numerical Solution of a Fully Thermally Coupled Generalized Universal Reynolds Equation (GURE) and its Application. Part 1: Conical Bearing // Tribology Transactions, 2007, Vol. 50, No. 4, pp. 540–557. doi:10.1080/10402000701631742 (2007).
12. Kasai M, Fillon M, Bouyer J, Jarny S. Influence of lubricants on plain bearing performance: evaluation of bearing performance with polymer-containing oils // Tribol. Int., 2012, Vol. 46, No. 1. <https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2011.03.009>.

**Nguyen Thai Ha**

Orel State University,

Graduate student of the Department of Mechatronics,

Mechanics and Robotics

302020, Orel, Naugorskoye shosse, 29

E-mail: havcn@mail.ru

© Нгуен Тхай Ха, 2024

## **ПРИБОРЫ, БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ**

УДК 629.7.05.61: 629.7.054.44

DOI: 10.33979/2073-7408-2024-367-5-52-59

В.М. СОЛДАТКИН, В.В. СОЛДАТКИН, Е.С. ЕФРЕМОВА

### **ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ВОЗДУШНЫХ СИГНАЛОВ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С ИНТЕГРИРОВАННЫМ ФЮЗЕЛЯЖНЫМ ПРИЕМНИКОМ ПАРАМЕТРОВ НАБЕГАЮЩЕГО ВОЗДУШНОГО ПОТОКА**

**Аннотация.** Рассмотрены особенности построения и недостатки традиционных и разрабатываемых систем воздушных сигналов (СВС) летательных аппаратов (ЛА) с устанавливаемыми в набегающем воздушном потоке распределенными по фюзеляжу приемниками и датчиками первичной информации о параметрах набегающего потока, нарушающих аэродинамику и увеличивающих заметность траектории движения ЛА, что ограничивает область применения традиционных СВС.

Рассмотрены принципы построения, конструктивно-функциональная схема, разработаны аналитические модели информативных сигналов, алгоритмов их обработки и определения выходных сигналов информационно-измерительной системы воздушных сигналов с неподвижным невыступающим за обшивку ЛА интегрированным фюзеляжным приемником параметров набегающего воздушного потока, с встроенными датчиками воспринимаемой информации и вычислителем, формирующим выходные сигналы системы воздушных сигналов ЛА.

**Ключевые слова:** летательный аппарат, движение, воздушные сигналы, информационно-измерительная система, интегрированный фюзеляжный приемник, принцип построения, аналитические модели, сигналы, алгоритмы обработки, определение выходных сигналов, конкурентные преимущества системы.

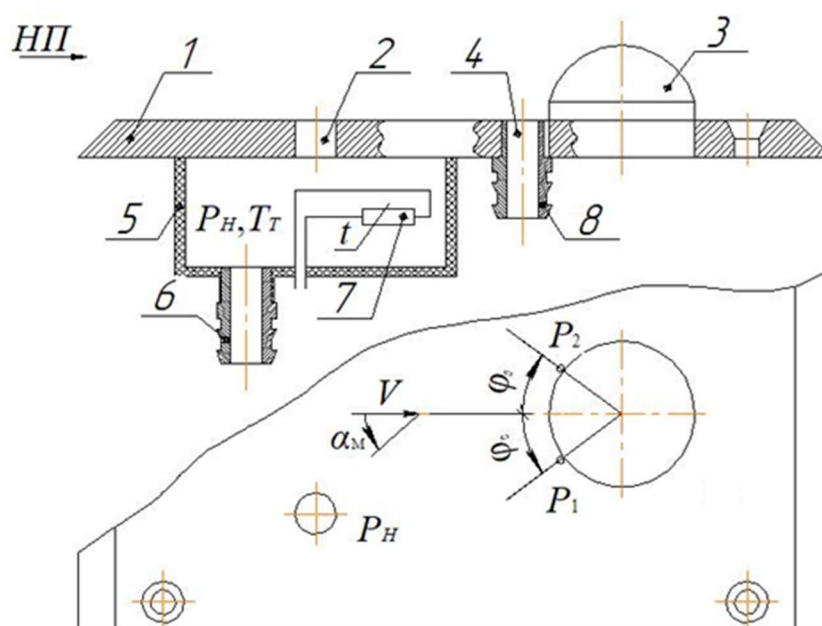
#### **Введение**

Полеты самолетов и других летательных аппаратов осуществляются в пределах атмосферы и при их пилотировании и автоматическом управлении, для обеспечения безопасности и решения полетных задач необходима достоверная информация о воздушных сигналах, определяющих движение ЛА относительно окружающей воздушной среды [1, 2]. Широко используемые на самолетах и ряде других ЛА информационно-измерительные системы воздушных сигналов для получения информации о параметрах набегающего воздушного потока используют установленные на правом и левом борту распределенные по фюзеляжу и вынесенные в набегающий поток приемники полного и статического давлений или комбинированные приемники воздушных давлений, приемники температуры торможения и фюзеляжные датчики углов направления набегающего потока, которые соединены пневмопроводами и электрическими кабелями с расположенным внутри фюзеляжа бортовым вычислителем, осуществляющим преобразование, обработку информации о параметрах набегающего воздушного потока, определение воздушных сигналов и выдачу выходных сигналов потребителям с требуемой точностью [3 – 5]. Однако, значительное количество автономных приемников и датчиков информации о параметрах набегающего воздушного потока, выступающих за обшивку фюзеляжа, пневмопроводы и электрические кабели усложняют конструкцию, увеличивают массу и стоимость, нарушают аэродинамику и увеличивают заметность траектории движения ЛА в атмосфере. Все это ограничивает область применения указанных систем воздушных сигналов, а также снижает эффективность систем, построенных на основе ионно-меточного и вихревого методов контроля параметров набегающего воздушного потока с одним выступающим приемником [6, 7]. Это определяет перспективность разработки информационно-измерительных систем воздушных сигналов с одним (интегрированным) невыступающим (фюзеляжным) приемником параметров набегающего воздушного потока, с встроенными датчиками воспринимаемой информации и встроенным вычислителем [8].

# Особенности построения информационно-измерительной системы воздушных сигналов летательного аппарата с интегрированным фюзеляжным приемником параметров набегающего воздушного потока.

В основу построения рассматриваемой информационно-измерительной системы положен широко используемый на самолетах плиточный (фюзеляжный) приемник статического давления с установленным на его обтекаемой поверхности аэродинамическим компенсатором погрешности восприятия статического давления плиточным приемником, обусловленной искажением невозмущенного набегающего воздушного потока при движении ЛА и обтекании фюзеляжа [9].

Для получения первичной информации о параметрах движения ЛА относительно окружающей воздушной среды предложено [7] на обтекаемой скользящим потоком поверхности плиты 1 интегрированного фюзеляжного приемника с отверстием 2 для восприятия статического давления  $P_H$  вблизи поверхности аэродинамического компенсатора 3 под углом  $\varphi_0$  к оси плиточного приемника расположить два отверстия 4 для восприятия давлений  $P_1$  и  $P_2$  (рисунок 1).



*Рисунок 1 – Конструктивная схема интегрированного фюзеляжного приемника параметров набегающего воздушного потока*

Для снижения уровня пульсаций статического давления в месте расположения отверстия 2 на скользящей поверхности интегрированного фюзеляжного приемника воспринимаемое давление  $P_H$  поступает в камеру торможения 5. Сглаженное статическое давление  $P_H$  через штуцер 6 поступает в канал преобразования и обработки системы воздушных сигналов. В камере торможения 5, термоизолированной от окружающей среды, установлен проводниковый терморезистор 7, регистрирующий температуру  $T_T$  торможения набегающего воздушного потока на высоте полета  $H$ . Воспринимаемые на поверхности интегрированного фюзеляжного приемника вблизи аэродинамического компенсатора 3 давления  $P_1$  и  $P_2$  через штуцер 8 поступают в канал преобразования и обработки системы, куда также поступает сопротивление  $R_{T_T}$  проводникового терморезистора. После преобразования давлений  $P_H$ ,  $P_1$  и  $P_2$  и сопротивления  $R_{T_T}$  в электрические сигналы они поступают на вход вычислителя, который по приведенным ниже аналитическим моделям определяет воздушные сигналы движения ЛА и формирует цифровые выходные сигналы информационно-измерительной системы воздушных сигналов с интегрированным фюзеляжным приемником параметров набегающего воздушного потока.

**Аналитические модели определения выходных параметров измерительно-вычислительной системы воздушных сигналов с неподвижным невыступающим приемником набегающего воздушного потока.**

Теоретической базой построения аналитических моделей информативных параметров и их обработки в каналах информационно-измерительной системы воздушных сигналов с интегрированным фюзеляжным приемником параметров набегающего воздушного потока являются результаты исследования распределения давления на скользящей поверхности вблизи аэродинамического компенсатора симметричной геометрической формы, приведенные в работе [3].

Для аэродинамического компенсатора, выполненного в виде полусферы с радиусом  $r_0$ , установленной на цилиндрическом основании того же радиуса с высотой равной  $0,25 \dots 0,3r_0$ , давления  $P_1$  и  $P_2$ , воспринимаемые на скользящей поверхности вблизи такого аэродинамического компенсатора, определяются аналитическими моделями вида [3]

$$\begin{aligned} P_1 - P_H &= \eta \frac{\rho_H V^2}{2} [4 \cos^2(\varphi_0 - \alpha_m) - \eta - 2] = \eta \frac{\rho_H V^2}{2} [4(1 - \sin^2(\varphi_0 - \alpha_m)) - \eta - 2] \\ P_2 - P_H &= \eta \frac{\rho_H V^2}{2} [4 \cos^2(\varphi_0 + \alpha_m) - \eta - 2] = \eta \frac{\rho_H V^2}{2} [4(1 - \sin^2(\varphi_0 + \alpha_m)) - \eta - 2] \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\eta = \left(\frac{r_0}{r}\right)^2$  – безразмерный конструктивный параметр, определяющий радиус  $r$

расположения отверстий для восприятия давлений  $P_1$  и  $P_2$  на скользящей поверхности фюзеляжного приемника вблизи поверхности аэродинамического компенсатора;

$\frac{\rho_H V^2}{2}$  – скоростной напор (динамическое давление) набегающего воздушного потока со

скоростью  $V = V_B$ ;  $V_B$  – истинная воздушная скорость движения ЛА;  $\varphi_0 - \alpha_m = \varphi_1$ ,  $\varphi_0 + \alpha_m = \varphi_2$  – углы, определяющие текущее угловое положение отверстий для восприятия давлений  $P_1$  и  $P_2$  относительно направления вектора  $V$  скорости набегающего воздушного потока;  $\rho_H$  – плотность воздуха на данной высоте  $H$ .

Принимая во внимание тригонометрические соотношения

$$\sin^2(\varphi_0 \mp \alpha_m) = \frac{1}{2} [1 - \cos 2(\varphi_0 \mp \alpha_m)] \quad \text{и}$$

$$\cos(2\varphi_0 \mp 2\alpha_m) = \cos 2\varphi_0 \cos 2\alpha_m \pm \sin 2\varphi_0 \sin 2\alpha_m,$$

аналитические модели (1) будут иметь вид

$$\begin{aligned} \Delta P_1 = P_1 - P_H &= 2\eta \frac{\rho_H V^2}{2} \left( \cos 2\varphi_0 \cos 2\alpha_m + \sin 2\varphi_0 \sin 2\alpha_m - \frac{\eta}{2} \right); \\ \Delta P_2 = P_2 - P_H &= 2\eta \frac{\rho_H V^2}{2} \left( \cos 2\varphi_0 \cos 2\alpha_m - \sin 2\varphi_0 \sin 2\alpha_m - \frac{\eta}{2} \right); \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\Delta P_1$  и  $\Delta P_2$  – информативные перепады давлений информационно-измерительной системы воздушных сигналов с интегрированным фюзеляжным приемником параметров набегающего воздушного потока.

Для получения аналитической модели определения местного аэродинамического угла  $\alpha_m$ , используя выражения (2) с учетом равенства  $\sin 2\alpha_m = 2 \sin \alpha_m \cos \alpha_m$ , получены значения  $\Delta P_1 - \Delta P_2$  и  $\Delta P_1 + \Delta P_2$  вида

$$\begin{aligned} \Delta P_1 - \Delta P_2 &= \eta \frac{\rho_H V^2}{2} (2 + 2 \cos 2\varphi_0 \cos 2\alpha_m + 2 \sin 2\varphi_0 \sin 2\alpha_m - \eta - \\ &\quad - 2 - 2 \cos 2\varphi_0 \cos 2\alpha_m + 2 \sin 2\varphi_0 \sin 2\alpha_m + \eta) = 4\eta \frac{\rho_H V^2}{2} \sin 2\varphi_0 \sin 2\alpha_m; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\Delta P_1 + \Delta P_2 = 4\eta \frac{\rho_H V^2}{2} \left( \cos 2\varphi_0 \cos 2\alpha_m - \frac{\eta}{2} \right). \quad (4)$$

При выборе значения угла расположения отверстий для восприятия давлений  $P_1$  и  $P_2$  равным  $\varphi_0=45^\circ$ , получим

$$\Delta P_1 - \Delta P_2 = 4\eta \frac{\rho_H V^2}{2} \sin 2\alpha_m; \quad (5)$$

$$|\Delta P_1 + \Delta P_2| = 2\eta^2 \frac{\rho_H V^2}{2}. \quad (6)$$

С учетом (5) и (6) получим отношение вида

$$\frac{\Delta P_1 - \Delta P_2}{|\Delta P_1 + \Delta P_2|} = \frac{2}{\eta^2} \sin 2\alpha_m. \quad (7)$$

Тогда, аналитическая модель для определения местного аэродинамического угла  $\alpha_m$  в канале информационно-измерительной системы воздушных сигналов с интегрированным фюзеляжным приемником параметров набегающего воздушного потока будет иметь вид

$$\alpha_m = \frac{1}{2} \arcsin \left( \frac{\eta}{2} \frac{\Delta P_1 - \Delta P_2}{|\Delta P_1 + \Delta P_2|} \right). \quad (8)$$

Используя выражение (3), аналитическая модель для определения истинной воздушной скорости  $V_B = V$ , с учетом равенства [10]

$$\rho_H = \rho_0 \frac{P_H T_0}{P_0 T_H}, \quad (9)$$

будет иметь вид

$$V_B = \sqrt{\frac{|\Delta P_1 + \Delta P_2| P_0 T_H}{\eta^2 \rho_0 T_0 P_H}}, \quad (10)$$

где  $\rho_0 = 1,225 \text{ кг/м}^3$ ,  $T_0 = 288,15 \text{ К}$ ,  $P_0 = 101325 \text{ Па}$  – массовая плотность, абсолютная температура и давление воздушной среды на высоте  $H=0$  стандартной атмосферы [11];  $\rho_H$  – массовая плотность воздуха на высоте  $H$ .

По измеренной температуре  $T_T$  торможения набегающего воздушного потока температура  $T_H$  наружного воздуха на данной высоте  $H$  определяется в соответствии с известной аналитической моделью вида [12]

$$T_H = \frac{T_T}{1 + 0,2\xi M^2}, \quad (11)$$

где  $\xi$  – коэффициент торможения набегающего воздушного потока, значение которого находится в пределах 0,98 ... 1,02.

Аналогично, используя связь числа Маха  $M$  и истинной воздушной скорости  $V_B$  вида [13]

$$M = \frac{V_B}{a_H} = \frac{V_B}{\sqrt{kgRT_H}}, \quad (12)$$

где  $a_H$  – скорость звука на высоте  $H$ ;  $k=1,4$  – показатель адиабаты воздуха;  $g = 9,80665 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;  $R = 29,27125 \text{ м/К}$  – газовая постоянная, аналитическая модель для определения числа Маха в каналах информационно-измерительной системы воздушных сигналов с интегрированным фюзеляжным приемником будет иметь вид

$$M = \sqrt{\frac{|\Delta P_1 + \Delta P_2| P_0}{\eta^2 kgR\rho_0 T_0 P_H}}. \quad (13)$$

С учетом связи приборной скорости  $V_{пр}$  и истинной воздушной скорости  $V_B$  вида [13]



$$V_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{\rho_H}{\rho_0}} V_B = \sqrt{\frac{P_H T_0}{P_0 T_H}} V_B, \quad (14)$$

аналитическая модель для определения приборной скорости в каналах информационно-измерительной системы воздушных сигналов с интегрированным фюзеляжным приемником имеет вид

$$V_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{|\Delta P_1 + \Delta P_2|}{\eta^2 \rho_0}}. \quad (15)$$

По статическому давлению  $P_H$ , воспринимаемому на скользящей поверхности фюзеляжного приемника, при компенсации аэродинамической погрешности, вносимой движением ЛА и обтеканием фюзеляжа с помощью аэродинамического компенсатора, барометрическая высота  $H$  в каналах информационно-измерительной системы воздушных сигналов с интегрированным фюзеляжным приемником определяется по широко используемым аналитическим моделям [13], например, вида

- при  $-2000 < H \leq 11000$  м

$$H = \frac{T_0}{\tau} \left[ 1 - \left( \frac{P_H}{P_0} \right)^{\tau R} \right]; \quad (16)$$

- при  $11000 \text{ м} \leq H < 15000$  м

$$H = H_{11} + RT_{11} \ln \frac{P_{11}}{P_H}, \quad (17)$$

где  $\tau = 0,0065$  К/м – температурный градиент;  $T_{11} = 216,65$  К;  $P_{11} = 22632$  Па – абсолютная температура и давление на высоте  $H = 11000$  м стандартной атмосферы.

Вертикальная скорость  $V_y$  в каналах информационно-измерительной системы воздушных сигналов с интегрированным фюзеляжным приемником определяется с использованием аналитической модели вида [14]

$$V_y = \frac{dH}{dt} \approx \frac{1}{4\tau_0} [H(t_i) - H(t_i - 2\tau_0) + H(t_i - \tau_0) - H(t_i - 3\tau_0)], \quad (18)$$

где  $t_i$  – начальный отсчет вычисляемой барометрической высоты;  $\tau_0$  – фиксированный интервал времени между отсчетами.

При необходимости измерения угла скольжения летательного аппарата дополнительный неподвижный невыступающий приемник параметров набегающего воздушного потока устанавливается на фюзеляже в плоскости изменения угла скольжения. Аналитическая модель для определения угла скольжения в канале информационно-измерительной системы воздушных сигналов с интегрированным фюзеляжным приемником будет иметь вид, аналогичный (8). Но при изменении угла скольжения происходит изменение значения измеряемого местного угла атаки  $\alpha_m$ , обусловленного искажению воздушного потока в месте установки на фюзеляже интегрированного приемника. Поэтому для устранения влияния угла скольжения на измеренное значение местного угла атаки на самолетах и других летательных аппаратах используют два датчика местного угла атаки, расположенных на правом и левом борту фюзеляжа. Такой подход целесообразно использовать и в информационно-измерительной системе с интегрированным фюзеляжным приемником параметров набегающего воздушного потока. При этом местный угол атаки  $\alpha_m^{\text{ср}}$  определяется как полу сумма местных углов  $\alpha_m^{\text{прав}}$  и  $\alpha_m^{\text{лев}}$ , измеренных на правом и левом борту фюзеляжа [3]

$$\alpha_m^{\text{ср}} = \frac{1}{2} (\alpha_m^{\text{прав}} + \alpha_m^{\text{лев}}), \quad (19)$$

который затем используется для вычисления истинного угла атаки  $\alpha$ , используя зависимость

вида [3, 14]

$$\alpha = \alpha_m^{\text{ср}} K_1(M, \beta) + K_2(M, \beta), \quad (20)$$

где  $K_1(M, \beta)$  и  $K_2(M, \beta)$  – коэффициенты, зависящие от места установки интегрированного фюзеляжного приемника, от изменения числа Маха и угла скольжения  $\beta$ . В общем случае вид функций  $K_1(M, \beta)$  и  $K_2(M, \beta)$  определяется по результатам летных испытаний для конкретного типа ЛА и места установки на нем интегрированных фюзеляжных приемников, используя технологии работы [15]. При правильном выборе места установки интегрированных фюзеляжных приемников можно обеспечить практическое постоянство коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$  в дозвуковом диапазоне скоростей.

Для измерения угла скольжения  $\beta$  дополнительный интегрированный фюзеляжный приемник устанавливается на верхней поверхности фюзеляжа в плоскости изменения угла скольжения, при этом ось интегрированного фюзеляжного приемника совпадает с направлением продольной оси ЛА. В этом случае измеренное значение угла скольжения практически не зависит от изменения угла атаки и будет определяться аналитической моделью вида

$$\beta = \frac{1}{2} \arcsin \left( \frac{\eta \Delta P_3 - \Delta P_4}{2 \Delta P_3 + \Delta P_4} \right), \quad (21)$$

где  $\Delta P_3 = P_3 - P_H$ ,  $\Delta P_4 = P_4 - P_H$ ,  $P_3$  и  $P_4$  – давления, воспринимаемые вблизи поверхности аэродинамического компенсатора дополнительного интегрированного фюзеляжного приемника, который обеспечивает избыточность информации по статическому давлению  $P_H$  и температуре торможения  $T_t$ , повышая надежность работы информационно-измерительной системы воздушных сигналов.

### Заключение

Таким образом, по воспринимаемым интегрированным фюзеляжным приемником параметрам  $P_H$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$  и  $T_t$ , набегающего воздушного потока в рассматриваемой информационно-измерительной системе воздушных сигналов, со встроенными датчиками первичной информации и встроенным вычислителем формируются выходные сигналы в цифровой форме по всем воздушным сигналам, определяющим движение ЛА относительно окружающей воздушной среды. Это существенно упрощает конструкцию, уменьшает массу и стоимость системы, исключает нарушение аэродинамики движения ЛА, не приводит к повышению заметности траектории движения ЛА в окружающей воздушной среде, что определяет конкурентные преимущества и перспективы применения информационно-измерительной системы воздушных сигналов с интегрированным фюзеляжным приемником параметров набегающего воздушного потока на сверхлегких самолетах и малоразмерных беспилотных, пилотируемых и дистанционно-пилотируемых летательных аппаратах самолетной схемы различных классов и назначения.

Разработанные принципы построения, конструктивная схема интегрированного фюзеляжного приемника, аналитические модели информативных сигналов и их обработки являются теоретической основой для системотехнической, схемотехнической и конструктивной разработки вариантов информационно-измерительной системы воздушных сигналов с интегрированным фюзеляжным приемником параметров набегающего воздушного потока летательного аппарата конкретного 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. – 448с.
4. Ключев Г.И. Измерители аэродинамических параметров летательных аппаратов / Г.И. Ключев, Н.Н.

Макаров, В.М. Солдаткин, И.П. Ефимов / Под ред. В.А. Мишина. – Ульяновск: Изд-во УлГТУ. – 2005. – 509с.

5. Макаров Н.Н. Системы обеспечения безопасности функционирования бортового эргатического комплекса: Теория, проектирование, применение: Монография / Н.Н. Макаров; под ред. докт. техн. наук В.М. Солдаткина. – М. Машиностроение / Машиностроение – Полет. – 2009. – 760с.

6. Крылов Д.Л., Солдаткин В.М., Солдаткина Е.С. Построение и оценка точности системы воздушных сигналов самолета с невыступающим приемником потока // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2015. – № 3(11). – С. 128-136.

7. Ефремова Е.С. Методические и инструментальные погрешности вихревой системы контроля высотно-скоростных параметров полета / Е.С. Ефремова, Р.В. Солдаткин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2017. – № 2(322). – С. 126-135.

8. Солдаткин В.М. Информационно-измерительная система контроля параметров движения атмосферы / В.М. Солдаткин, Е.С. Ефремова, С.В. Смирнова, В.С. Солдаткин // Вестник НЦБЖД. – 2023. – № 3 (57). – С. 149-157.

9. Патент SU 271140, МКИ G01P 5/12. Фюзеляжный приемник статического давления с аэродинамическим компенсатором / Б.И. Абрамов, В.А. Смольцов, М.И. Петрова. Заявка № 1241422/18-10; Заявл. 14.05.1968. Оpubл. 12.05.1970. – Бюл. – № 17. – 3с.

10. Залманзон Л.А. Проточные элементы пневматических приборов контроля и управления / Л.А. Залманзон. – М.: Изд-во АН СССР. – 1961. – 247с.

11. ГОСТ 4401-81. Атмосфера стандартов. Параметры. М.: Изд-во Стандартов. – 1981. – 179с.

12. Боднер В.А. Приборы первичной информации / В.А. Боднер. – М.: Машиностроение. – 1981. – 344с.

13. Браславский Д.А. Приборы и датчики летательных аппаратов / Д.А. Браславский. – М.: Машиностроение. – 1970. – 392с.

14. Ганеев Ф.А. Системотехническое проектирование измерительно-вычислительных систем: Учебное пособие к курсовому и дипломному проектированию / Ф.А. Ганеев, А.А. Порунов, В.В. Солдаткин, В.М. Солдаткин; под ред. проф. В.М. Солдаткина. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. – 2011. – 150с.

15. 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.

**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

V.M. SOLDATKIN, V.V. SOLDATKIN, E.S. EFREMOVA

## INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM OF AIRCRAFT AIR SIGNALS WITH AN INTEGRATED FUSELAGE RECEIVER OF INCOMING AIR FLOW PARAMETERS

**Abstract.** *The features of the construction and disadvantages of traditional and developed air signal systems (SHS) of aircraft (LA) with receivers and sensors of primary information about the parameters of the incoming flow distributed over the fuselage in the incoming air flow, which violate aerodynamics and increase the visibility of the trajectory of the aircraft, which limits the scope of traditional SHS.*

*The principles of construction, a constructive and functional scheme are considered, analytical models of informative signals, algorithms for their processing and determination of output signals of an information and measurement system of air signals with a fixed integrated fuselage receiver of incoming air flow parameters, with built-in sensors of perceived information and a computer forming the output signals of the aircraft air signal system are developed.*

**Keywords:** *aircraft, motion, air signals, information and measurement system, integrated fuselage receiver,*

*construction principle, analytical models, signals, processing algorithms, determination of output signals, competitive advantages of the system.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Filatov G.A. Bezopasnost poletov v vozmushchennoy atmosfere / G.A. Filatov, G.S. Puminova, P.V. Silvestrov. – M.: Transport. – 1992. – 272s.
2. Sinyakov A.N. Sistemy avtomaticheskogo upravleniya LA i ikh silovymi ustanovkami / A.N. Sinyakov, F.A. Shaymardanov. – M.: Mashinostroyeniye. – 1991. – 320s.
3. Soldatkin V.M. Metody i sredstva izmereniya aerodinamicheskikh uglov letatelnykh apparatov / V.M. Soldatkin. – Kazan: Izd-vo Kazan. gos. tekhn. un-ta. – 2001. – 448s
4. Klyuyev G.I. Izmeriteli aerodinamicheskikh parametrov letatelnykh apparatov / G.I. Klyuyev, N.N. Makarov, V.M. Soldatkin, I.P. Yefimov / Pod red. V.A. Mishina. – Ulyanovsk: Izd-vo UIGTU. – 2005. – 509s.
5. Makarov N.N. Sistemy obespecheniya bezopasnosti funktsionirovaniya bortovogo ergaticheskogo kompleksa: Teoriya, proyektirovaniye, primeneniye: Monografiya / N.N. Makarov; pod red. dokt. tekhn. nauk V.M. Soldatkina. – M. Mashinostroyeniye / Mashinostroyeniye – Polet. – 2009. – 760s
6. Krylov D.L., Soldatkin V.M., Soldatkina E.S. Postroyeniye i otsenka tochnosti sistemy vozdukhnykh signalov samoleta s nevystupayushchim priyemnikom potoka // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2015. – № 3(11). – S. 128-136.
7. Efremova E.S. Metodicheskiye i instrumentalnyye pogreshnosti vikhrevoi sistemy kontrolya vysotno-skorostnykh parametrov poleta / E.S. Efremova. R.V. Soldatkin // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2017. – № 2(322). – S. 126-135.
8. Soldatkin V.M. Informatsionno-izmeritelnaya sistema kontrolya parametrov dvizheniya atmosfery / V.M. Soldatkin, E.S. Efremova, S.V. Smirnova, V.S. Soldatkin // Vestnik NTSBZHD. – 2023. – № 3 (57). – S. 149-157.
9. Patent SU 271140, MKI G01P 5/12. Fyuzelyazhnyy priyemnik staticheskogo davleniya s aerodinamicheskim kompensatorom / B.I. Abramov, V.A. Smoltsov, M.I. Petrova. Zayavka № 1241422/18-10; Zayavl. 14.05.1968. Opubl. 12.05.1970. – Byul. – № 17. – 3s.
10. Zalmanzon L.A. Protochnyye elementy pnevmaticheskikh priborov kontrolya i upravleniya / L.A. Zalmanzon. – M.: Izd-vo AN SSSR. – 1961. – 247s.
11. GOST 4401-81. Atmosfera standartov. Parametry. M.: Izd-vo Stnadartov. – 1981. – 179s.
12. Bodner V.A. Pribory pervichnoy informatsii / V.A. Bodner. – M.: Mashinostroyeniye. – 1981. – 344s.
13. Braslavskiy D.A. Pribory i datchiki letatelnykh apparatov / D.A. Braslavskiy. – M.: Mashinostroyeniye. – 1970. – 392s.
14. Ganeyev F.A. Sistemotekhnicheskoye proyektirovaniye izmeritelnykh i vychislitelnykh sistem: uchebnik dlya kursovogo i diplomnogo proyektirovaniya / F.A. Ganeyev, A.A. Porunov, V.V. Soldatkin, V.M. Soldatkin; pod red. prof. V.M. Soldatkina. – Kazan: Izd-vo Kazan. Gos. tekhn. desyat chasov – 2011. – 150s.
15. Kharin E.G. Tekhnologiya letnykh ispytaniy bortovogo oborudovaniya letatelnykh apparatov s primeneniym kompleksa bortovykh trayektornykh izmereniy / E.G. Kharin, I.A. Kopylov. – M.: MAI-PRINT. – 2012. – 360c.

**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

© В.М. Солдаткин, В.В. Солдаткин, Е.С. Ефремова, 2024

Е.В. ПОТАПОВА

## МЕТОД СИНТЕЗА БИОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ИНТРАОПЕРАЦИОННОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ПЕРФУЗИОННО-МЕТАБОЛИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В МАЛОИНВАЗИВНОЙ ХИРУРГИИ

**Аннотация.** Малоинвазивная хирургия (МИХ) является новаторским подходом в оперативной медицине. Малоинвазивные хирургические вмешательства (МИХВ) предоставляют обширный список преимуществ, включая, улучшение результатов лечения для пациентов и снижение общих затрат на здравоохранение. Несмотря на это, МИХВ имеют ряд недостатков, в том числе связанных с ограниченными возможностями получения информации о функциональном состоянии оперируемых органов. Поэтому актуальными остаются вопросы разработки дополнительных каналов диагностики с целью возможности контроля состояния биотканей во время проведения МИХВ. Перфузионно-метаболические параметры, включающие в себя характеристики гемодинамики и клеточного метаболизма, могут в достаточной мере описывать изменения, связанные с патологическими состояниями биологических тканей. Известно, что методы оптической диагностики являются высокочувствительными к метаболическим и перфузионным нарушениям, поэтому внедрение оптических технологий в МИХ является перспективной и многообещающей задачей для развития медицинского приборостроения. Статья посвящена синтезу биотехнической системы (БТС) интраоперационной оптической диагностики перфузионно-метаболических параметров в МИХ. Учеными рассмотрены взаимосвязи перфузионно-метаболических параметров биологических объектов с медико-биологическими параметрами, регистрируемые методами оптической диагностики, описана формализованная схема процесса интраоперационной диагностики. Синтез БТС произведен с учетом взаимосвязей совокупностей перфузионно-метаболических параметров биотканей (информационная составляющая), методов, методик и алгоритмов (методическая составляющая), устройств оптической диагностики с оптоволоконными зондами различной конфигурации (инструментальная составляющая), программных средств для обработки массивов медицинских данных и измерений в автоматизированном режиме с минимальным участием медицинского персонала (программно-алгоритмическая составляющая). На основании предложенной БТС в дальнейшем могут быть сконструированы новые технические средства, а также разработаны методы и алгоритмы для улучшения результатов оказания хирургической помощи.

**Ключевые слова:** биотехническая система, интраоперационная оптическая диагностика, малоинвазивная хирургия, перфузионно-метаболические параметры.

### Введение

Малоинвазивная хирургия (МИХ) получила широкое распространение за последние несколько десятилетий и в настоящее время является преобладающим хирургическим подходом в различных областях медицины, включая абдоминальную хирургию и гинекологию, кардинально изменив стандарты лечения множества патологий. К основным преимуществам малоинвазивных хирургических вмешательств (МИХВ) относятся меньшее количество периоперационных осложнений, более короткая продолжительность пребывания пациентов в больнице, меньший объем анестезиологического пособия, общее снижение затрат на лечение, улучшенный косметический эффект и более быстрое время восстановления [1,2]. Несмотря на это, МИХВ имеют ряд недостатков, в том числе связанных с ограниченными возможностями получения информации о функциональном состоянии оперируемых органов. Поэтому актуальными являются вопросы разработки дополнительных каналов диагностики контроля состояния биотканей во время проведения МИХВ.

Перфузионно-метаболические параметры, включающие в себя характеристики гемодинамики и клеточного метаболизма, могут в достаточной мере описывать изменения, связанные с патологическими состояниями биологических тканей. Микроциркуляция крови играет важную роль в связывании общей гемодинамики организма с субклеточными метаболическими процессами [3]. Известно, что методы оптической диагностики или методы «оптической биопсии», как часто в последние годы их называют в литературе, не имеют альтернатив при определении перфузионно-метаболических параметров биологических тканей *in vivo* [4,5]. При взаимодействии света с биологическими тканями происходит комбинация различных оптических процессов, таких как отражение, поглощение, рассеяние и флуоресценция. Спектроскопический анализ каждого из этих процессов дает различную

информацию об оптических свойствах тканей, которая может иметь диагностическое значение [6–10].

В литературе описано достаточно большое количество попыток внедрения оптических технологий в инструментарий МИХВ для определения перфузионно-метаболических параметров биологических тканей при решении диагностических задач в онкологии (дифференциация неизмененных и опухолевых тканей, классификация различных типов опухолей) и оценке функционального состояния органов в интраоперационной диагностике. Обзор современного состояния и перспектив применения оптической биопсии в МИХ приведен в нескольких работах [11–13]. Однако, несмотря на многочисленные попытки создания инструментов для интраоперационной оптической навигации и диагностики, на сегодняшний день отсутствует обоснованная методологическая база построения медицинских приборов и систем, позволяющих решать проблему оценки перфузионно-метаболических параметров органов интраоперационно *in vivo*, что мешает активному внедрению данных технологий в клиническую практику.

Решение выявленной проблемы требует синтеза биотехнической системы (БТС). БТС представляет собой совокупность биологических и технических элементов, объединенных в единую функциональную систему целенаправленного поведения [14,15], создание которой необходимо проводить с позиций системного подхода, позволяющего на основании исходных данных (назначение системы, функции), знаний об элементной базе и опыта проектирования подобных систем, предложить обобщенную модель системы, отвечающую поставленным задачам с максимально возможной степенью соответствия [14,16,17].

Целью работы является разработка метода синтеза биотехнической системы интраоперационной оптической диагностики перфузионно-метаболических параметров в МИХ с позиций системного подхода.

#### **Описание основных составляющих БТС интраоперационной оптической диагностики**

Синтез БТС интраоперационной оптической диагностики перфузионно-метаболических параметров биотканей при МИХВ должен быть произведен с учетом взаимосвязей совокупностей перфузионно-метаболических параметров биотканей (информационная составляющая), методов, методик и алгоритмов (методическая составляющая), устройств оптической диагностики с оптоволоконными зондами различной конфигурации (инструментальная составляющая), программных средств для обработки массивов медицинских данных и измерений в автоматизированном режиме с минимальным участием медицинского персонала (программно-алгоритмическая составляющая).

Первый этап формирования БТС предполагает задание биологического звена БТС и формирование его модели, в которой фигурируют атрибуты задания (входные, выходные переменные, показатели состояния и т.п.) [18]. Так как функциональное состояние биотканей можно описать с позиций изменения перфузионно-метаболических параметров биологических тканей, то необходимо определить возможный набор характеристик биологического звена, описывающих состояние микроциркуляции крови и метаболического обмена. Обобщенная схема взаимодействия капиллярного кровотока и клеток биологических тканей через интерстициальную жидкость (интерстициальное пространство) с целью обмена питательными веществами и конечными продуктами метаболизма с обозначением основных перфузионно-метаболических параметров биотканей приведена на рисунке 1.

Главное целевое назначение системы кровообращения заключается в транспорте питательных веществ к тканям и удалении клеточных метаболитов. Артериолы контролируют кровоток в каждом участке тканевой капиллярной сети, а местный уровень метаболизма в тканях, в свою очередь, контролирует диаметр артериол в зависимости от индивидуальных потребностей [19].

Используя системный подход, функциональное состояние биологических тканей формализовано можно описать некоторым набором перфузионно-метаболических параметров  $\{V_{арт}, V_{кап}, V_{вен}, tPO_2, N_{эр}, \mu_a, \mu_s, c_{НАДН} (c_{НАДНсвоб}/c_{НАДНсвяз}), c_{ФАД}\}$ . В эти параметры входят:

– скорость кровотока в артериолах, капиллярах и венах ( $V_{арт}, V_{кап}, V_{вен}$ );

– напряжение кислорода в тканях ( $tPO_2$ ) – парциальное давление кислорода в интерстициальном пространстве биологической ткани – параметр, отражающий баланс между доставкой кислорода по капиллярам и потреблением кислорода биологическими тканями;

- количество рассеивающих элементов крови (эритроцитов) в объеме ткани ( $N_{эр}$ );
- содержание кофермента НАДН ( $c_{НАДН}$ );
- содержание свободной и связанной форм НАДН ( $c_{НАДНсвоб}/c_{НАДНсвяз}$ );
- содержание кофермента ФАД ( $c_{ФАД}$ ).

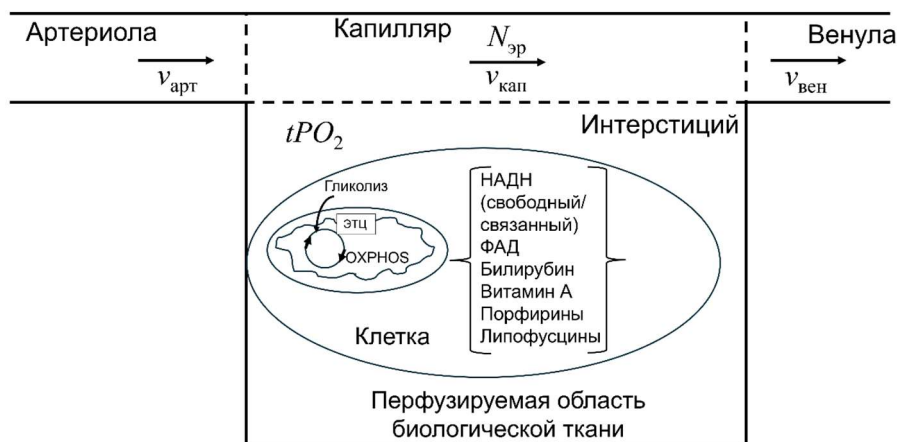


Рисунок 1 – Обобщенная схема характеристик микрогемодинамики и клеточного метаболизма. (ОХРНОС – окислительное фосфорилирование, ЭТЦ – электрон-транспортная цепь)

В некоторых случаях при описании патологий, связанных с биохимическими процессами, свойственными конкретным органам, кроме перечисленных параметров могут быть использованы:

- содержание билирубина ( $c_{билирубин}$ );
- содержание витамина А ( $c_{вита}$ );
- содержание порфиринов ( $c_{РРХ}$ );
- содержание липофусцинов ( $c_{липофусцин}$ ) и т.д.

На основании ранее проведенных исследований и опубликованных данных [7,10,20–22] установлена взаимосвязь перфузионно-метаболических параметров биологических объектов с медико-биологическими параметрами (МБП), которые возможно зарегистрировать методами оптической диагностики (таблица 1).

Таблица 1 – Взаимосвязи перфузионно-метаболических параметров биологических объектов с МБП, регистрируемые методами оптической диагностики

Перфузионно-метаболический параметр биологической ткани	Метод оптической диагностики	Медико-биологический параметр
$v_{кап}, N_{эр}$	ЛДФ	$I_m, A_c, A_d, A_m, A_n, A_z$
	ЛСКВ	$P_{ЛСКВ}$
$\mu_a, \mu_s$	СДО	$S_tO_2$
$c_{НАДН}$	ФС	$I_{FНАДН}$
$c_{НАДНсвоб}$	ФС с временным разрешением	$\tau_1, \alpha_1$
$c_{НАДНсвяз}$	ФС с временным разрешением	$\tau_2, \alpha_2$
$c_{ФАД}$	ФС	$I_{FФАД}$
$c_{НАДН}, c_{ФАД}$	ФС	$Redox\ Ratio\ (RR)$
$c_{билирубин}$	ФС	$I_{Fбилирубин}$
	СКР	$I_{КРбилирубин}$
$c_{вита}$	ФС	$I_{Fвита}$
$c_{РРХ}$	ФС	$I_{FРРХ}$
$c_{липофусцин}$	ФС	$I_{Fлипофусцин}$

К МБП, полученным в результате применения методов оптической диагностики, относят:

–  $I_m$  (пф.ед. – перфузионные единицы) – показатель микроциркуляции, характеризующий уровень перфузии объема ткани за единицу времени, являющийся величиной прямо пропорциональной скорости капиллярного кровотока ( $v_{\text{кап}}$ ) и количеству эритроцитов в зондируемом объеме ткани ( $N_{\text{эр}}$ ). В некоторых случаях описание гемодинамики дополняют параметрами, характеризующими регуляцию кровотока в микроциркуляторном русле посредством сердечных, дыхательных, миогенных, нейрогенных и эндотелиальных осцилляций соответственно ( $A_c, A_d, A_m, A_n, A_o$ );

–  $P_{\text{лскв}}$  (отн. ед.) – спекл-перфузия, показатель гемодинамики кровотока, связанный с количеством элементов, рассеивающих свет в диагностическом объеме ( $N_{\text{эр}}$ ), и их скоростью движения ( $v_{\text{кап}}$ );

–  $S_tO_2$  (%) – тканевая сатурация – среднее насыщение крови кислородом в определенном участке ткани, отражающее баланс между локальным снабжением кислородом и его потреблением (параметр, ассоциированный с  $tPO_2$ );

–  $I_{\text{ФАДН}}$  (отн. ед.) – интенсивность флуоресценции кофермента НАДН;

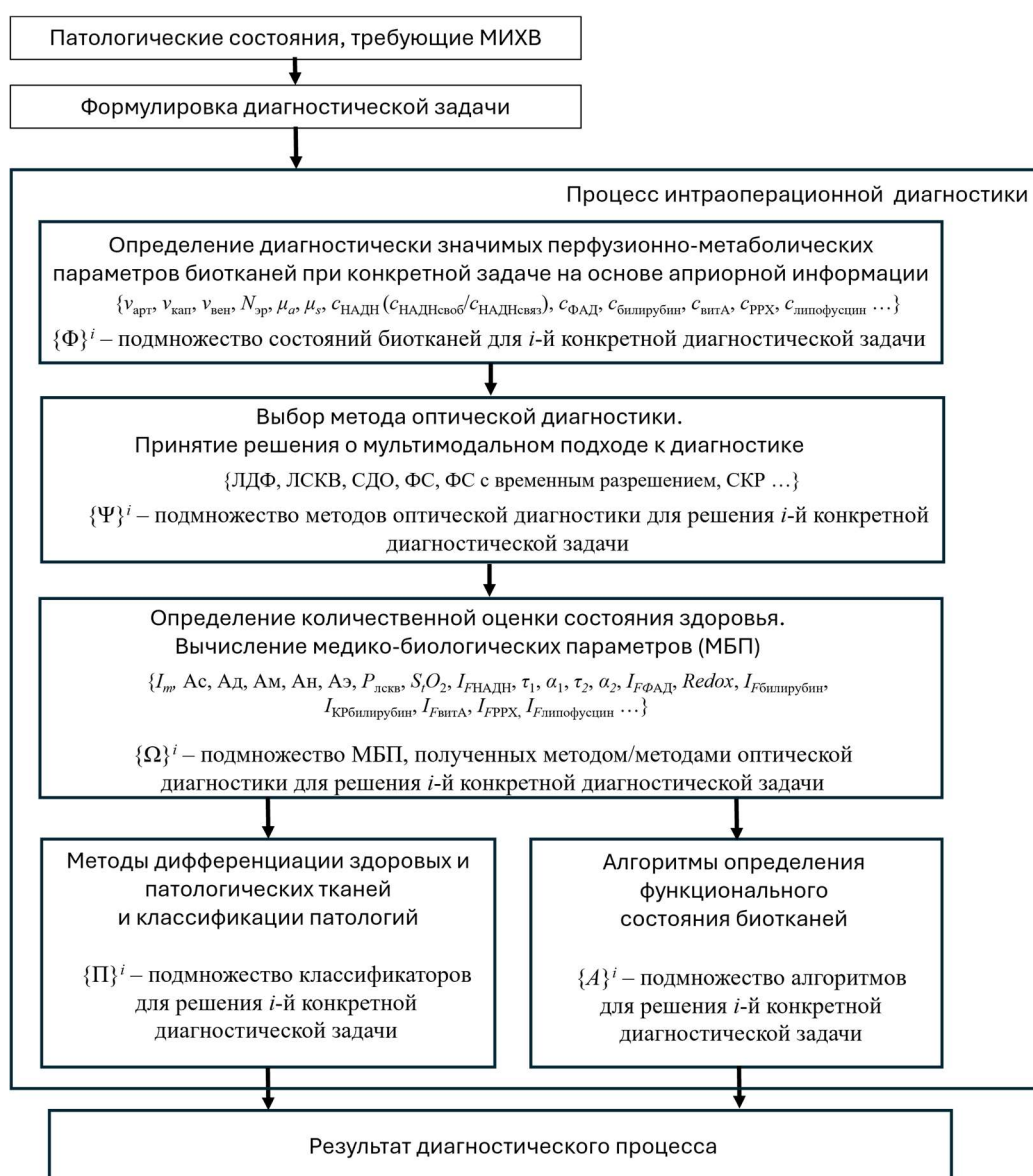


Рисунок 2 – Формализованная схема процесса интраоперационной диагностики перфузионно-метаболических параметров в МИХ



–  $\tau_1, \alpha_1$  (нс) – длительность короткоживущей компоненты и вклад короткоживущей компоненты в общий сигнал флуоресценции; короткоживущая компонента затухания флуоресценции, возбужденной на длине волны 365 нм, ассоциирована со свободной формой НАДН;

–  $\tau_2, \alpha_2$  (нс) – длительность долгоживущей компоненты и вклад долгоживущей компоненты в общий сигнал флуоресценции; долгоживущая компонента затухания флуоресценции, возбужденной на длине волны 365 нм, ассоциирована со связанной формой НАДН;

–  $I_{F\Phi AD}$  (отн. ед.) – интенсивность флуоресценции кофермента ФАД;

–  $RR$  (*Redox Ratio*) – редокс-отношение – отношение окисленных электронных переносчиков к восстановленным, которое может быть вычислено различными способами, в том числе как:  $I_{F\text{НАДН}}/I_{F\Phi AD}$ ;  $I_{F\Phi AD}/I_{F\text{НАДН}}$ ;  $I_{F\Phi AD}/(I_{F\Phi AD}+I_{F\text{НАДН}})$ ;

$I_{F\text{билирубин}}$  (отн. ед.) – интенсивность флуоресценции билирубина;

$I_{K\text{Рбилирубин}}$  (отн. ед.) – интенсивность пика комбинационного рассеяния билирубина;

$I_{F\text{вита}}$  (отн. ед.) – интенсивность флуоресценции витамина А;

$I_{F\text{РРХ}}$  (отн. ед.) – интенсивность флуоресценции порфиринов;

$I_{F\text{липофусцин}}$  (отн. ед.) – интенсивность флуоресценции липофусцина.

Формализованная схема интраоперационной диагностики перфузионно-метаболических параметров при МИХВ приведена на рисунке 2.

В процессе интраоперационной диагностики для пациентов с патологическими состояниями, требующими МИХВ, в первую очередь определяется конкретная диагностическая задача, например определение функционального состояния тканей или дифференциация здоровых и патологических тканей. После этого на основе априорной информации проводится определение диагностически значимых перфузионно-метаболических параметров биотканей, отражающих подмножество состояний биотканей  $\{\Phi\}^i$  для  $i$ -й конкретной диагностической задачи.

Затем на основании знаний о взаимосвязи перфузионно-метаболических параметров биологических объектов с МБП, которые возможно зарегистрировать методами оптической диагностики, выбирается один или несколько (в рамках мультимодального подхода) методов, формируя их подмножество  $\{\Psi\}^i$  для решения  $i$ -й конкретной диагностической задачи. После этого на основании регистрации оптических сигналов и их обработки проводится количественная интерпретация функционального состояния биологической ткани путем вычисления подмножества МБП  $\{\Omega\}^i$ .

После регистрации вектора информативных признаков в патологических и условно здоровых тканях в зависимости от поставленной диагностической задачи вычисляется подмножество классификаторов  $\{\Pi\}^i$  для решения  $i$ -й конкретной диагностической задачи с целью разработки методов дифференциации здоровых и патологических тканей или классификации патологий, а также  $\{A\}_i$  – подмножество алгоритмов определения функционального состояния биотканей.

Для инструментальной реализации интраоперационной оптической диагностики в МИХ необходимо руководствоваться принципами адекватного подбора технических составляющих БТС. Общими в схемах методов ОД являются блоки воздействия, доставки и приема, а также регистрации оптического излучения. При выборе источников излучения важными параметрами являются спектральные диапазоны излучения, которые должны быть обоснованы методом диагностики. Также необходимо принимать во внимание допустимую мощность оптического воздействия на биологические объекты. При этом важно руководствоваться стандартами, протоколами и рекомендациями в области дозиметрии лазерного излучения при воздействии на кожу или слизистые для предотвращения теплового и фотохимического повреждения биологических тканей [23–26]. При выборе детекторов оптического излучения в блоке регистрации необходимо проводить спектральное согласование с источниками излучения, а также отдавать предпочтение более высоким параметрам быстродействия для обеспечения высокой скорости диагностики, проводимой интраоперационно в режиме ограниченного количества времени. Важное место в инструментальном обеспечении БТС занимает блок доставки и приема оптического излучения. При проектировании оптоволоконных зондов необходимо максимально учитывать тип МИХВ: дренирующие, пункционные или лапароскопические. С учетом этого необходимо

понимать конструктивные особенности медицинского инструментария, через который будет осуществляться доступ к биологическим тканям органов и систем: возможность доставки оптического излучения через существующие оптические каналы (лапароскопы), инструментальные каналы (троакары), через специально спроектированные оптоволоконные зонды с диаметрами, позволяющими проводить их через дренирующие системы, пункционные иглы. С точки зрения надежной и качественной регистрации сигналов оптической диагностики необходимо учитывать опыт конструирования зондов для биомедицинской спектроскопии и уже с этим учетом проектировать конструкции, выбирать материалы и технологии изготовления [27–29].

Для эффективного проведения диагностики управление источниками и приемниками излучения, а также анализ данных, должны проводиться автоматически через программно-алгоритмическую составляющую БТС. Система должна обеспечивать интерактивный режим работы, включая отображение диагностической информации в виде графиков, таблиц, числовых значений, адекватных восприятию оператора и удобных для однозначной трактовки получаемых данных.

Для разработки алгоритмов, методов и методик необходимо руководствоваться выбором адекватных подходов к статистической обработке и автоматической классификации медицинских данных [30–32]. При разработке новых методов диагностики необходимо опираться на текущие уровни диагностической точности существующих инструментальных методов исследования. Методическая составляющая БТС должна обеспечивать разработку методов, методик и алгоритмов для определения и классификации перфузионно-метаболического состояния биологических тканей путем анализа данных об их оптических характеристиках на основе описательной, выводной (индуктивной) статистики, а также с использованием интеллектуальных методов обработки с применением машинного обучения, которые в конечном счете позволят проводить не только обработку больших массивов полученных медицинских данных, но и выполнять измерения в автоматизированном режиме, с минимальным участием медицинского персонала.

### **Синтез БТС интраоперационной диагностики перфузионно-метаболических параметров в малоинвазивной хирургии**

В общем виде задача синтеза БТС диагностического назначения заключается в определении структуры и параметров системы, исходя из заданных требований к значениям показателей эффективности ее функционирования, а также способов обеспечения целей функционирования системы. При разработке структурно-функциональной схемы БТС интраоперационной диагностики перфузионно-метаболических параметров в МИХ с позиции системного подхода, можно выделить следующие составные элементы данного процесса:

1) Обеспечение информационной составляющей: конкретизация целевой функции БТС (перечень решаемых диагностических задач); определение перфузионно-метаболических параметров биологического объекта, отражающих связь с диагностируемыми патологиями и позволяющих решать сформулированные диагностические задачи; выбор методов оптической диагностики.

2) Обеспечение инструментальной и программно-алгоритмической составляющих БТС: разработка технической реализации узлов устройства и программно-алгоритмического обеспечения получения и обработки данных; разработка требований к специальным техническим устройствам, согласующим информационные и управленческие характеристики технической и биологической частей БТС.

3) Обеспечение методической составляющей: разработка алгоритмов анализа данных, регистрируемых выбранными методами оптической диагностики.

На последнем этапе производится согласование взаимодействия технических элементов, биологического звена и оператора на основе комплексного исследования функционирования БТС с целью оптимизации характеристик каждого из звеньев. Проводится подготовка к исследованию БТС в полунатурных (модельных) и натурных условиях с целью дальнейшего перехода к инженерной реализации БТС.

Выделив основные составляющие в основе этапа синтеза БТС интраоперационной диагностики перфузионно-метаболических параметров в МИХ, можно определить их взаимосвязь, а также определить их взаимодействие. Элементы, входящие в метод синтеза разрабатываемой БТС, и взаимосвязи между ними, представлены на рисунке 3.

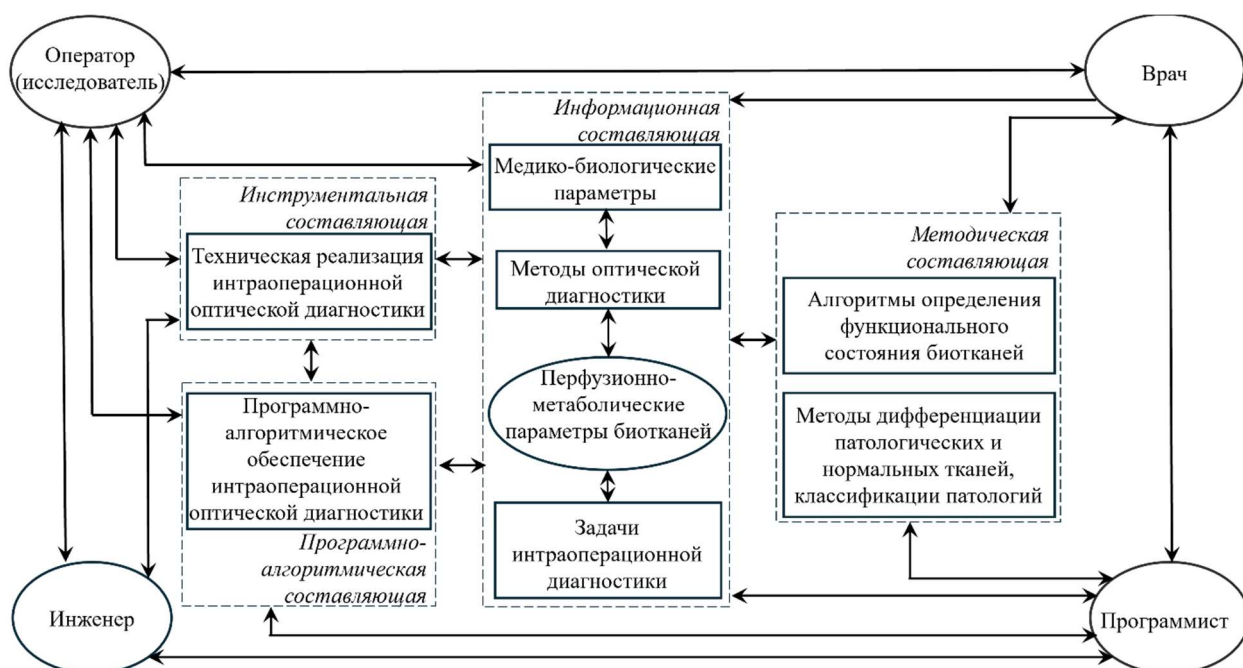


Рисунок 3 – Элементы, входящие в метод синтеза БТС интраоперационной диагностики перфузионно-метаболических параметров в МИХ, и взаимосвязи между ними

На основе комплексного биотехнического подхода с учетом всего изложенного выше предложена обобщённая схема БТС интраоперационной диагностики перфузионно-метаболических параметров биотканей при МИХВ (рисунок 4).

Разработанная схема БТС включает в себя биологический объект, врача-хирурга, а также ряд технических блоков: управления, воздействия, доставки и приема оптического излучения и обработки данных, которые позволяют сформировать результат диагностики.

БО описывается набором характеристик, связанных с перфузионно-метаболическими параметрами биологических тканей, которые обусловлены функциональным состоянием органов или их патологическими состояниями. Блок управления и отображения данных служит для ввода данных о пациенте и контроля интраоперационной диагностики на всех этапах. Блок воздействия представляет собой источник или набор источников оптического излучения, которые выбираются с учетом используемого метода оптической диагностики. В медико-технических требованиях уточняются их спектральные характеристики и допустимая мощность воздействия на биообъект с учетом конструктивных особенностей доставки излучения. Блок доставки и приема излучения включает в себя специально разработанные оптоволоконные зонды, конструктивно совместимые со стандартным хирургическим инструментарием, используемым в МИХ.

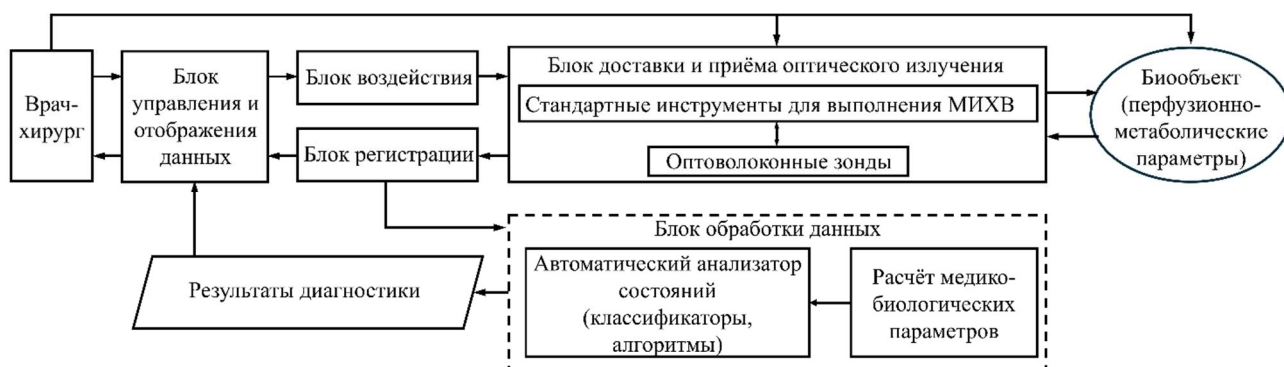


Рисунок 4 – Обобщённая схема БТС интраоперационной оптической диагностики перфузионно-метаболических параметров биотканей при МИХВ

В технических требованиях прописываются требуемые материалы, обеспечивающие доставку оптического излучения без потерь, прием света с максимальным соотношением сигнал-шум, а также геометрические особенности зондов для возможности их позиционирования в стандартных инструментах для МИХВ. Блок регистрации представляет собой приёмники оптического излучения, выбор которых зависит от применяемого метода оптической диагностики и должен быть согласован со спектральными характеристиками источников излучения. Блок обработки данных базируется на вычислительных алгоритмах и включает в себя последовательные этапы расчета МБП. Далее эти данные поступают в автоматический анализатор состояний, где выбирается соответствующий классификатор, построенный на основе предварительных клинических исследований под конкретные клинические задачи, или алгоритм для определения функционального состояния органов. Врач-хирург контролирует состояние пациента и обеспечивает ход процедуры МИХВ. С учетом полученной диагностической информации врач может изменять ход МИХВ, например, скорректировать положение кончика пункционной иглы или определить персонализированную тактику лечения по результатам диагностики функционального состояния органа-мишени.

### Заключение

Задача синтеза медицинских БТС возникает, прежде всего, при создании новой медицинской техники. Несмотря на все преимущества МИХВ, они являются сложными манипуляциями с технической точки зрения и требуют высокой квалификации и большого врачебного опыта. Активное развитие и внедрение МИХ побуждает к созданию новых технологий, которые могли бы улучшить результаты данного вида оказания хирургической помощи. Данные технологии предполагают получение дополнительной диагностической информации, которая могла бы помочь хирургу принимать решения о тактике диагностических МИХВ или планировать индивидуальную терапевтическую траекторию при лечебных МИХВ. Примером такого применения могут служить диагностические пункционные МИХВ, требующие более точной навигации биопсийного инструмента. Методы оптической диагностики являются высокочувствительными к метаболическим и перфузионным нарушениям и коррелируют с функциональным статусом биологических тканей, поэтому внедрение оптических технологий в МИХ является перспективной и многообещающей задачей для построения новых медицинских приборов, улучшающих качество медицинской помощи. На основании предложенной обобщенной БТС в дальнейшем могут быть сконструированы технические средства, а также разработаны методы и алгоритмы для решения различных клинических задач в МИХ различных областей медицины.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 23-25-00487, <https://rscf.ru/en/project/23-25-00487>.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов, Ю.В. Возможности минимально инвазивных рентгено-хирургических методов в абдоминальной хирургии / Ю.В. Иванов, Д.П. Лебедев, А.В. Алехнович // Клиническая практика. – 2014. – 3(10). – С. 35-42.
2. Sahakyan, M.A. Minimally invasive pancreatic surgery—where are we going? / M.A. Sahakyan, K.J. Labori, F. Primavesi, K. Søreide, S. Stättner, B. Edwin // Eur. Surg. – 2019. – 51. – P. 98-104.
3. Fagrell, B. Microcirculation: its significance in clinical and molecular medicine / B. Fagrell, M. Intaglietta // J. Intern. Med. – 1997. – 241(5). – P. 349-362.
4. Wang, T.D. Optical biopsy: a new frontier in endoscopic detection and diagnosis / T.D. Wang, Dam J. Van // Clin. Gastroenterol. Hepatol. – 2004. – 2(9). – P. 744-753.
5. Croce, A.C. Autofluorescence-based optical biopsy: An effective diagnostic tool in hepatology / A.C. Croce, A. Ferrigno, G. Bottiroli, M. Vairetti // Liver Int. – 2018. – 38(7). – P. 1160-1174.
6. Дунаев, А.В. Метод и устройство оценки функционального состояния микроциркуляторно-тканевых систем организма человека на основе мультипараметрической оптической диагностики / А.В. Дунаев // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2020. – 23(4). – С. 77-91.
7. Тучин, В.В. Оптическая биомедицинская диагностика: в 2-х т.: учебное издание / Тучин В.В. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 559 с.
8. Тучин, В.В. Оптическая биомедицинская диагностика / В.В. Тучин // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика. – 2005. – 5(1). – С. 39-53.

9. Mayevsky, A. Mitochondrial function and tissue vitality: bench-to-bedside real-time optical monitoring system / A. Mayevsky, R. Walden, E. Pewzner, A. Deutsch, E. Heldenberg, J. Lavee, S. Tager, E. Kachel, E. Raanani, S. Preisman, V. Glauber, E. Segal // *J. Biomed. Opt.* – 2011. – 16(6). – P. 67004.
10. Дунаев, А.В. Мультимодальная оптическая диагностика микроциркуляторно-тканевых систем организма человека: монография / А.В. Дунаев. – Старый Оскол: ТНТ, 2022. – 440 с.
11. Kim, J.A. Optical spectroscopy for in vivo medical diagnosis—a review of the state of the art and future perspectives / J.A. Kim, D.J. Wales, G.-Z. Yang // *Prog. Biomed. Eng.* – 2020. – 2(4). – P. 42001.
12. Barik, A.K. In vivo spectroscopy: optical fiber probes for clinical applications / A.K. Barik, S.P. M, J. Lukose, R. Upadhyay, M.V. Pai, V.B. Kartha, S. Chidangil // *Expert Rev. Med. Devices.* – 2022. – 19(9). – P. 657-675.
13. Evers, D.J. Optical spectroscopy: current advances and future applications in cancer diagnostics and therapy / D.J. Evers, B.H.W. Hendriks, G.W. Lucassen, T.J.M. Ruers // *Futur. Oncol.* – 2012. – 9(3). – P. 307-320.
14. Ахутин, В.М. Теория и проектирование диагностической электронно-медицинской аппаратуры / В.М. Ахутин, О.Б. Лурье, А.П. Немирко, Е.П. Попечителев. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1980. – 147 с.
15. Попечителев, Е.П. Методы медико-биологических исследований. Системные аспекты: Учебное пособие / Е.П. Попечителев. – Житомир: Изд-во ЖИТИ, 1997. – 187 с.
16. Ахутин, В.М. Биотехнические системы: теория и проектирование / В.М. Ахутин. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1981. – 220 с.
17. Дунаев, А.В. Принципы построения технических средств мультипараметрической оптической диагностики для оценки функционального состояния микроциркуляторно-тканевых систем / А.В. Дунаев // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.* – 2020. – 344(6). – С. 131-140.
18. Акулов, С.А. Основы теории биотехнических систем / С.А. Акулов, А.А. Федотов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 259 с.
19. Гайтон, А.К. Медицинская физиология / А.К. Гайтон, Д.Э. Холл. – М.: Логосфера, 2008. – 1296 с.
20. Жеребцов, Е.А. Флуоресцентная диагностика митохондриальной функции в эпителиальных тканях in vivo: монография / Е.А. Жеребцов, В.В. Дрёмин, А.И. Жеребцова, Е.В. Потапова, А.В. Дунаев. – Орёл: ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», 2018. – 107 с.
21. Кандурова, К.Ю. Методы оптической биопсии и их перспективы применения для интраоперационного анализа тканевого метаболизма и микроциркуляции крови в мини-инвазивной хирургии / К.Ю. Кандурова, В.В. Дрёмин, Е.А. Жеребцов, А.Л. Альянов, А.В. Мамошин, Е.В. Потапова, А.В. Дунаев, В.Ф. Мурадян, В.В. Сидоров, А.И. Крупаткин // *Регионарное кровообращение и микроциркуляция.* – 2018. – 17(3). – С. 71-79.
22. Рогаткин, Д.А. Метрологическое обеспечение методов и приборов неинвазивной медицинской спектрофотометрии / Д.А. Рогаткин, А.В. Дунаев, Л.Г. Лапаева // *Медицинская техника.* – 2010. – 2(260). – С. 30-37.
23. The International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. ICNIRP guidelines on limits of exposure to laser radiation of wavelengths between 180 nm and 1,000  $\mu\text{m}$  // *Health Phys.* – 2013. – 105(3). – P. 271-295.
24. De Luca, D. Laser safety standards and measurements of hazard parameters for medical lasers / D. De Luca, I. Delfino, M. Lepore // *Int. J. Opt. Appl.* – 2012. – 2(6). – P. 80-86.
25. Peng, Q. Lasers in medicine / Q. Peng, A. Juzeniene, J. Chen, L.O. Svaasand, T. Warloe, K.E. Giercksky, J.E. Moan // *Reports Prog. Phys.* – 2008. – 71(5). – P. 56701.
26. Yun, S.H. Light in diagnosis, therapy and surgery / S.H. Yun, S.J.J. Kwok // *Nat. Biomed. Eng.* – 2017. – 1. – P. 0008.
27. Utzinger, U. Fiber optic probes for biomedical optical spectroscopy / U. Utzinger, R.R. Richards-Kortum // *J. Biomed. Opt.* – 2003. – 78(5). – P. 121-147.
28. Surazynski, L. Real-Time Tissue Classification Using a Novel Optical Needle Probe for Biopsy / L. Surazynski, V. Hassinen, M.T. Nieminen, T. Seppänen, T. Myllylä // *Appl. Spectrosc.* – 2024. – 78(5). – P. 477-485.
29. Danielyan, G. Multi channels fiber optic reflex probes for fluorescent and UV-VIS-NIR spectroscopy based on novel types of multimode fiber optics bundles / G. Danielyan, I. Shilov, A. Zamyatin, L. Kochmarev, A. Makovetskii, S. Savosin // *Proc. SPIE.* – 2019. – 11075. – P. 1107515.
30. Красько, О.В. Статистический анализ данных в медицинских исследованиях: в 2 ч. часть 1. / О.В. Красько. – Минск: МГЭУ им. А.Д. Сахарова, 2014. – 127 с.
31. Кочетов, А.Г. Методы статистической обработки медицинских данных: Методические рекомендации для ординаторов и аспирантов медицинских учебных заведений, научных работников / А.Г. Кочетов, О.В. Лянг, В.П. Масенко, И.В. Жиров, С.Н. Наконечников, С.Н. Терещенко. – М.: РКНПК, 2012. – 42 с.
32. Мамаев, А.Н. Статистические методы в медицине / А.Н. Мамаев, Д.А. Кудлай. – М.: Практическая медицина, 2021. – 136 с.

**Потапова Елена Владимировна**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл

Кандидат технических наук, доцент кафедры

приборостроения, метрологии и сертификации,

старший научный сотрудник научно-

технологического центра биомедицинской фотоники

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29

E-mail: potapova\_ev\_ogu@mail.ru

E.V. POTAPOVA

# METHOD OF SYNTHESIZING A BIOTECHNICAL SYSTEM FOR INTRAOPERATIVE OPTICAL DIAGNOSTICS OF PERFUSION AND METABOLIC PARAMETERS IN MINIMALLY INVASIVE SURGERY

**Abstract.** *Minimally invasive surgery (MIS) is an emerging approach to surgery. MIS offers an extensive list of benefits, including improved patient outcomes and reduced overall healthcare costs. However, MIS has a number of drawbacks, including a limited ability to obtain information about the functional state of the organs being treated. Therefore, the issues of developing additional diagnostic channels to monitor the state of biological tissues during MIS procedures remain relevant. Perfusion and metabolic parameters, including hemodynamic and cellular metabolic characteristics, can adequately describe changes associated with pathological states of biological tissues. It is known that optical diagnostic methods are highly sensitive to metabolic and perfusion disorders; therefore, the introduction of optical technologies in MIS is a promising task for the development of medical instrumentation. The article is devoted to the synthesis of a biotechnical system (BTS) of intraoperative optical diagnostics of perfusion and metabolic parameters in MIS. The correlations between perfusion and metabolic parameters of biological objects and biomedical parameters registered by optical diagnostic methods are taken into account and a formalized scheme of the intraoperative diagnostic process is described. The synthesis of BTS is made taking into account the interrelations of the set of perfusion and metabolic parameters of biological tissues (information component), methods, procedures and algorithms (methodical component), optical diagnostic devices with fiber optic probes of various configurations (instrumental component), software for processing medical data arrays and measurements in automated mode with minimal participation of medical personnel (software and algorithmic component). Based on the proposed BTS, it will become possible to develop new technical means, methods and algorithms to improve the results of surgical care.*

**Keywords:** *biotechnical system, intraoperative optical diagnostics, minimally invasive surgery, perfusion and metabolic parameters.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Ivanov, Y.V. Vozmozhnosti minimalno invazivnykh rentgeno-khirurgicheskikh metodov v abdominalnoy khirurgii / Y.V. Ivanov, D.P. Lebedev, A.V. Alekhnovich // Klinicheskaya praktika. – 2014. – 3(10). – P. 35-42. (In Russ.).
2. Sahakyan, M.A. Minimally invasive pancreatic surgery—where are we going? / M.A. Sahakyan, K.J. Labori, F. Primavesi, K. Søreide, S. Stättner, B. Edwin // Eur. Surg. – 2019. – 51. – P. 98-104.
3. Fagrell, B. Microcirculation: its significance in clinical and molecular medicine / B. Fagrell, M. Intaglietta // J. Intern. Med. – 1997. – 241(5). – P. 349-362.
4. Wang, T.D. Optical biopsy: a new frontier in endoscopic detection and diagnosis / T.D. Wang, Dam J. Van // Clin. Gastroenterol. Hepatol. – 2004. – 2(9). – P. 744-753.
5. Croce, A.C. Autofluorescence-based optical biopsy: An effective diagnostic tool in hepatology / A.C. Croce, A. Ferrigno, G. Bottiroli, M. Vairetti // Liver Int. – 2018. – 38(7). – P. 1160-1174.
6. Dunaev, A.V. Metod i ustroystvo otsenki funktsionalnogo sostoyaniya mikrotsirkulyatorno-tkanevykh sistem organizma cheloveka na osnove multiparametricheskoy opticheskoy diagnostiki / A.V. Dunaev // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Rossii. Radioelektronika. – 2020. – 23(4). – P. 77-91. (In Russ.).
7. Tuchin, V.V. Opticheskaya biomeditsinskaya diagnostika: v 2-kh t.: uchebnoye izdaniye / Tuchin V.V. – M.: FIZMATLIT, 2007. – 559 p. (In Russ.).
8. Tuchin, V.V. Opticheskaya biomeditsinskaya diagnostika / V.V. Tuchin // Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya Fizika. – 2005. – 5(1). – P. 39-53. (In Russ.).
9. Mayevsky, A. Mitochondrial function and tissue vitality: bench-to bedside real-time optical monitoring system / A. Mayevsky, R. Walden, A. Pewzner, A. Deutsch, E. Heldenberg, J. Lavee, S. Tager, E. Kachel, E. Raanani, S. Preisman, V. Glauber, E. Segal // J. Biomed. Opt. – 2011. – 16(6). – P. 67004.
10. Dunaev, A.V. Multimodalnaya opticheskaya diagnostika mikrotsirkulyatorno-tkanevykh sistem organizma cheloveka: monografiya / A.V. Dunaev. – Staryy Oskol: TNT, 2022. – 440 p. (In Russ.).
11. Kim, J.A. Optical spectroscopy for in vivo medical diagnosis—a review of the state of the art and future perspectives / J.A. Kim, D.J. Wales, G.-Z. Yang // Prog. Biomed. Eng. – 2020. – 2(4). – P. 42001.
12. Barik, A.K. In vivo spectroscopy: optical fiber probes for clinical applications / A.K. Barik, S.P. M, J. Lukose, R. Upadhyay, M.V. Pai, V.B. Kartha, S. Chidangil // Expert Rev. Med. Devices. – 2022. – 19(9). – P. 657-675.
13. Evers, D.J. Optical spectroscopy: current advances and future applications in cancer diagnostics and therapy / D.J. Evers, B.H.W. Hendriks, G.W. Lucassen, T.J.M. Ruers // Futur. Oncol. – 2012. – 9(3). – P. 307-320.
14. Akhutin, V.M. Teoriya i proyektirovaniye diagnosticheskoy elektronno-meditsinskoy apparatury / V.M. Akhutin, O.B. Lurye, A.P. Nemirko, Ye.P. Popechitelev. – L.: Izd-vo LGU, 1980. – 147 p. (In Russ.).
15. Popechitelev, Y.P. Metody mediko-biologicheskikh issledovaniy. Sistemnyye aspekty: Uchebnoye posobiye / Y.P. Popechitelev. – Zhitomir: Izd-vo ZHITI, 1997. – 187 p. (In Russ.).
16. Akhutin, V.M. Biotekhnicheskiye sistemy: teoriya i proyektirovaniye / V.M. Akhutin. – L.: Izd-vo LGU, 1981. – 220 p. (In Russ.).
17. Dunaev, A.V. Printsipy postroyeniya tekhnicheskikh sredstv multiparametricheskoy opticheskoy diagnostiki dlya otsenki funktsionalnogo sostoyaniya mikrotsirkulyatorno-tkanevykh sistem / A.V. Dunaev // Fundamentalnyye i

prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2020. – 344(6). – P. 131-140. (In Russ.).

18. Akulov, S.A. Osnovy teorii biotekhnicheskikh sistem / S.A. Akulov, A.A. Fedotov. – M.: FIZMATLIT, 2014. – 259 p. (In Russ.).

19. Guyton, A.K. Meditsinskaya fiziologiya / A.K. Guyton, D.E. Hall. – M.: Logosfera, 2008. – 1296 p. (In Russ.).

20. Zherebtsov, E.A. Fluorestsennaya diagnostika mitokhondrialnoy funktsii v epiteliyalnykh tkanyakh in vivo: monografiya / E.A. Zherebtsov, V.V. Dremine, A.I. Zherebtsova, E.V. Potapova, Zherebtsov. – Orel: FGBOU VO «OGU imeni I.S. Turgeneva», 2018. – 107 p. (In Russ.).

21. Kandurova, K.Y. Optical biopsy methods and their prospects of application for intraoperative analysis of tissue metabolism and blood microcirculation in minimally invasive surgery / K.Y. Kandurova, V.V. Dremine, E.A. Zherebtsov, A.L. Alyanov, A.V. Mamoshin, E.V. Potapova, A.V. Dunaev, V.F. Muradyan, V.V. Sidorov, A.I. Krupatkin // Regional blood circulation and microcirculation. – 2018. – 17(3). – P. 71-79. (In Russ.).

22. Rogatkin, D.A. Metrologicheskoye obespecheniye metodov i priborov neinvazivnoy meditsinskoy spektrofotometrii / D.A. Rogatkin, A.V. Dunaev, L.G. Lapayeva // Meditsinskaya tekhnika. – 2010. – 2(260). – P. 30-37. (In Russ.).

23. The International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. ICNIRP guidelines on limits of exposure to laser radiation of wavelengths between 180 nm and 1,000  $\mu\text{m}$  // Health Phys. – 2013. – 105(3). – P. 271-295.

24. De Luca, D. Laser safety standards and measurements of hazard parameters for medical lasers / D. De Luca, I. Delfino, M. Lepore // Int. J. Opt. Appl. – 2012. – 2(6). – P. 80-86.

25. Peng, Q. Lasers in medicine / Q. Peng, A. Juzeniene, J. Chen, L.O. Svaasand, T. Warloe, K.E. Giercksky, J.E. Moan // Reports Prog. Phys. – 2008. – 71(5). – P. 56701.

26. Yun, S.H. Light in diagnosis, therapy and surgery / S.H. Yun, S.J.J. Kwok // Nat. Biomed. Eng. – 2017. – 1. – P. 0008.

27. Utzinger, U. Fiber optic probes for biomedical optical spectroscopy / U. Utzinger, R.R. Richards-Kortum // J. Biomed. Opt. – 2003. – 78(5). – P. 121-147.

28. Surazynski, L. Real-Time Tissue Classification Using a Novel Optical Needle Probe for Biopsy / L. Surazynski, V. Hassinen, M.T. Nieminen, T. Seppänen, T. Myllylä // Appl. Spectrosc. – 2024. – 78(5). – P. 477-485.

29. Danielyan, G. Multi channels fiber optic reflex probes for fluorescent and UV-VIS-NIR spectroscopy based on novel types of multimode fiber optics bundles / G. Danielyan, I. Shilov, A. Zamyatin, L. Kochmarev, A. Makovetskii, S. Savosin // Proc. SPIE. – 2019. – 11075. – P. 1107515.

30. Krasko, O.V. Statisticheskii analiz dannykh v meditsinskikh issledovaniyakh: v 2 ch. chast1. / O.V. Krasko. – Minsk: MGEU im. A.D. Sakharova, 2014. – 127 p. (In Russ.).

31. Kochetov, A.G. Metody statisticheskoy obrabotki meditsinskikh dannykh: Metodicheskiye rekomendatsii dlya ordinatov i aspirantov meditsinskikh uchebnykh zavedeniy, nauchnykh rabotnikov / A.G. Kochetov, O.V. Lyang, V.P. Masenko, I.V. Zhirov, S.N. Nakonechnikov, S.N. Tereshchenko. – M.: RKNPK, 2012. – 42 p. (In Russ.).

32. Mamayev, A.N. Statisticheskiye metody v meditsine / A.N. Mamayev, D.A. Kudlay. – M.: Prakticheskaya meditsina, 2021. – 136 p. (In Russ.).

**Potapova Elena Vladimirovna**

Orel State University,

Ph.D., associate professor of the Department of Instrumentation, Metrology and Certification,  
senior researcher of Research and Development Center of Biomedical Photonics

302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29

E-mail: potapova\_ev\_ogu@mail.ru

© Е.В. Потапова, 2024

# **КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА, ИСПЫТАНИЯ** **И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ**

УДК 303.732.4: 65.014.1

DOI: 10.33979/2073-7408-2024-367-5-71-80

М.А. ПОЛЯКОВА, И.Г. ГУН, Э.М. ГОЛУБЧИК, Ф.А. СТОЛЯРОВ

## **ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА ТЕХНОЛОГИИ ХОЛОДНОЙ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПРЕДПРИЯТИЙ-ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ**

**Аннотация.** *Статья посвящена системному анализу процесса холодной листовой штамповки как метода для производства рычага передней подвески легкового автомобиля. Проведенный анализ может быть использован для организации взаимодействия между головным OEM-предприятием, производящим автомобильные компоненты, и его поставщиками других уровней.*

**Ключевые слова:** системный анализ, технологическая система, холодная листовая штамповка, автомобильный компонент, производитель, организация производства.

### **Введение**

Современное развитие автомобильной промышленности характеризуется наличием довольно сложных и развитых связей между производителями различных автомобильных компонентов, узлов и систем. Эти взаимодействия регулируются, прежде всего, основополагающими международными стандартами в области менеджмента качества ISO 9001, а также IATF 16949. Постоянное совершенствование и обновление существующих марок автомобилей, появление новых видов транспортных средств являются причинами для расширения сети взаимодействующих предприятий-производителей, а также различных компаний, занимающихся в смежных областях деятельности. Такая организация производства неизбежно определяет и основные тенденции развития бизнес-отношений, согласования планов производства, которые становятся все более узкоспециализированными [1].

Для описания такого рода модели взаимодействия предприятий в зарубежной литературе используется термин OEM - Original Equipment Manufacturer - «оригинальный производитель оборудования». Такая модель организации производства интенсивно развивается в настоящее время между предприятиями-производителями автомобильной отрасли. Сущность данной организации производства заключается в следующем.

Головное предприятие-производитель является конечным потребителем продукции всех поставщиков и субпоставщиков (OEM). OEM формирует свой комплекс требований к продукции, которые сформулированы в специальных технических спецификациях. Техническая спецификация заказчика OEM-уровня представляет собой комплекс технических требований и методов испытаний, которые необходимо выполнить, чтобы выпускать продукцию на регламентируемом уровне. Техническая спецификация является неотъемлемой частью согласованного между заказчиком и поставщиком габаритного чертежа. Техническая спецификация может содержать ссылки на другие нормативные документы или другие спецификации. Требования OEM не могут противоречить требованиям государств, в которых автомобиль производится и продается.

Далее следует поставщик первого уровня (*Tier-1*). Поставщик первого уровня осуществляет свои поставки непосредственно на завод OEM. Продукция поставщика первого уровня должна соответствовать всем перечисленным выше требованиям. Помимо этого, должны соблюдаться требования государства, в котором располагается производство поставщика 1 уровня, требованиям OEM, а также специальным требованиям к конкретному изделию. Помимо требований к продукции, поставщик первого уровня должен соответствовать требованиям к СМК, формулируемым со стороны OEM. Это может быть как наличие сертификата заданного образца, полученного от сторонней организации, или же



(дополнительно к сертифицированной СМК) наличие ранга поставщика, который присваивает OEM. Поставщик первого уровня поставляет готовое изделие (например, шаровую опору) или механизм в сборе (например, рулевое управление) на завод OEM.

Другие поставщики следующих уровней  $i$  (*Tier i*) будут являться поставщиками первого уровня относительно *Tier 1* и субпоставщиком относительно OEM. Требования со стороны *Tier 1* декомпозируются и предъявляются дифференцированно (например, поставщику металла нет необходимости знать требования к резинам). Наличие сертификатов СМК или иных способов оценки деятельности поставщика уровня  $i$  остается на усмотрение поставщика уровня 1, который обязан обеспечить заданный уровень качества производимой продукции, которая будет поставляться им на OEM. Поставщик уровня  $i$  поставляет компоненты, например защитный чехол или заготовку пальца шарового.

Поставщик уровня  $i+1$  (*Tier i+1*) является поставщиком первого уровня относительно *Tier i*, субпоставщиком относительно *Tier 1* и «субсубпоставщиком» для OEM. Требования к поставляемым компонентам также дифференцированы. Поставщик уровня  $i+1$  поставляет субкомпоненты. Например, заготовка пальца поставщику *Tier 1* от поставщика *Tier i* приходит с защитным покрытием, однако нанесением защитного покрытия занимается сторонняя организация, которая и является поставщиком *Tier i+1*.

Всесторонний анализ взаимодействия совокупности OEM-предприятий различных уровней представлен в работе [2]. Такая форма организации производства позволяет, с одной стороны, использовать опыт и стратегию развития поставщиков первого уровня и распространять их на другие предприятия данной системы, а с другой – уменьшить стоимость продукции и сократить возможные риски, когда в одну большую сеть объединены предприятия разных отраслей промышленности, расположенных в разных странах. Такое сложное взаимодействие OEM-предприятий может быть представлено в виде единой платформы, объединяющей в том числе различные научные организации, проводящие исследовательские работы для решения стоящих перед OEM-предприятиями производственных задач.

Оригинальный подход для описания развития отношений между производителем и OEM-поставщиками представлен в работе [3]. В основе своего исследования авторы используют s-образную кривую, которая, как известно, описывает развитие различных сложных систем на разных стадиях своего существования [4]. Как отмечают авторы, это обеспечивает максимальный эффект как при принятии оперативных решений, так и при прогнозировании и планировании дальнейших направлений деятельности предприятий и компаний. В результате проведенных исследований установлено, что, несмотря на необходимые организационные преобразования отношений между предприятиями-партнерами, такая система взаимодействия обеспечивает получение достаточно реального результата по сокращению времени производства и повышению производительности.

Другой вариант описания эффективности предприятиями-производителями (OEM) и поставщиками первого уровня используется в работе [5]. Модель системной динамики позволяет описывать развитие отношений между OEM-поставщиками во времени. Данные, полученные в период с 2004 по 2021 год, позволили авторам сделать вывод об эффективности взаимодействия предприятий с точки зрения уровня конкурентоспособности. Авторы пришли к выводу, что сотрудничество между такого рода взаимосвязанными предприятиями зависит от состояния рынка. При стабильной рыночной ситуации предприятия получают большую финансовую выгоду. Однако при наличии на рынке большого количества конкурентов происходит резкий скачок развития совокупности предприятий OEM-поставщиков. По мнению авторов, разработанная модель позволяет с достаточно высокой точностью прогнозировать отношения между предприятиями.

Анализ опыта взаимодействия OEM-поставщиков в рамках реализации ряда проектов компании AT&T представлен в работе [6]. Использование такой организации производства обеспечивает быстрый выход на рынок производимой продукции. При этом ключевыми моментами эффективного взаимодействия предприятий являются наличие долговременного согласованного плана выпуска продукции, организация непосредственно самого производства

продукции в рамках сотрудничества с OEM-поставщиками и наличие многолетних договоренностей с организациями, занимающихся сбытом продукции, которые должны обеспечить обязательную поддержку продукции на рынке, что связано непосредственным образом, как с успехом данного предприятия, так и головной компании, занимающейся распределением продукции OEM-производителей.

При организации взаимодействия OEM-предприятий различных уровней немаловажную роль играют особенности технологических процессов обработки различных материалов. Например, специфику обработки магниевых сплавов следует учитывать при организации производства изделий для автомобильной промышленности, авиастроения, медицинского оборудования и энергетики [7].

Вполне очевидно, что столь тесное взаимодействие предприятий-производителей самых различных по своей сути и функциональным свойствам автомобильных компонентов, которые используют различные технологические процессы и оборудование, должно строиться на основе строгого научного подхода к анализу существующих процессов. Одним из таких подходов, позволяющих выявить так называемые «узкие места», которые могут возникнуть при производстве того или иного вида продукции, является системный анализ.

Традиционно системный анализ применяется, главным образом, к исследованию искусственных систем, например, социальных, экономических, организационных, технических, человеко-машинных и т.п., в которых важная роль принадлежит деятельности человека [8-10]. Наиболее широкое распространение системный анализ получил в теории и практике управления, где эффективность его применения доказана при разработке, принятии и обосновании решений, связанных с проектированием, созданием и управлением сложными, многоуровневыми и многокомпонентными искусственными системами [11]. При разработке, конструировании и эксплуатации подобных систем, как правило, возникают проблемы, относящиеся не только к свойствам их составных частей (элементов, подсистем и связей), но и к закономерностям функционирования системного объекта в целом и обеспечения его жизненного цикла (общесистемные проблемы). Кроме того, широкий круг специфических задач управления можно решить с использованием методов системного анализа [12]. Поэтому системный анализ относят к области системной инженерии, которая изучает вопросы проектирования, создания и эксплуатации структурно-сложных систем любого масштаба и назначения [13].

Исследование технологических процессов с целью разработки новых и совершенствования действующих процессов долгое время велись технологами в рамках исследования непосредственно обработки исходного материала для получения готового изделия с требуемыми функциональными свойствами. Углубление исследований привело к комплексному моделированию технологического процесса как совокупности оборудования, инструмента, технологии обработки, экономических и ряда других факторов. Термин «системный подход» содержательно отражает группу методов, с помощью которых реальный объект описывается как совокупность взаимодействующих компонентов, что подразумевает, например, формализованное представление технологических систем. При исследовании действующих и создании новых технологических систем обычно преимущественную роль играет математическое и натурное моделирование процессов, а также машин и механизмов, необходимых для реализации этих процессов. Однако это мешает видеть принципиальные структурные связи внутри и вне создаваемой или исследуемой системы. Разработка подробной математической модели до изучения общесистемных связей не позволяет достаточно эффективно использовать все особенности системы и получить наиболее рациональное решение. Гораздо эффективнее для систем, состоящих из большого числа взаимосвязанных подсистем, вначале изучить возможности подсистем, связи между ними. Обычный инженерный подход подразумевает разработку принципиальных схем процесса, выявляющих ряд связей и зависимостей внутри системы и позволяющих затем создать аналитическую модель. Однако простота принципиальных схем обычно связана с недостатком их строгости. Модели общей теории систем устраняют этот недостаток, внося в описание математическую строгость, и в то же время сохраняют достоинство принципиальных схем –

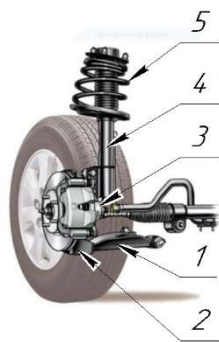
их простоту. Таким образом, модели общей теории систем по степени детализации занимают промежуточное положение между принципиальной схемой системы и её математической (машинной) моделью.

При проектировании технологического процесса производства любого изделия системный анализ позволяет определить существующие потоки вещества, энергии и информации на каждой операции, установить взаимосвязь между ними, что необходимо для корректной оценки существующей технологии [14, 15]. Также это является основой для поиска возможных эффективных путей решения существующих проблем и формулировки рекомендаций для устранения причин возникновения проблем в будущем.

Целью данной работы является проведение системного анализа технологического процесса холодной листовой штамповки рычага передней подвески легкового автомобиля LADA LARGUS, который производится OEM-производителем и является комплектующим изделием для изготовления сборочной единицы – передней подвески Мак-Ферсон.

### **Основная часть**

Одним из преимуществ конструкции передней подвески Мак-Ферсон является относительная простота конструкции, которая в то же время обладает достаточно высокой надежностью (рисунок 1).



**Рисунок 1 – Подвеска типа Мак-Ферсон:**

*1 – рычаг передней подвески, 2 – шаровой шарнир, 3 – поворотный кулак,  
4 – амортизационная стойка, 5 – пружина подвески*

Рычаг передней подвески (рисунок 2) при движении автомобиля воспринимает значительные растягивающие и сжимающие нагрузки, передаваемые от дорожного полотна на колесо, шаровой шарнир и непосредственно рычаг.



**Рисунок 2 – Рычаг передней подвески автомобиля Lada Largus в сборе:**

*1 – металлическая часть, 2 – резинометаллический шарнир, 3 – шаровой шарнир*

Технологический процесс холодной листовой штамповки данного автомобильного компонента состоит из следующих операций: вырубка, вытяжка, пробивка отверстий и нижнего контура отбортовки, отбортовка отверстий и наружного контура, калибровка. Системный анализ позволяет представить данный процесс как целостное множество элементов в совокупности связей и отношений между ними (рисунок 3).

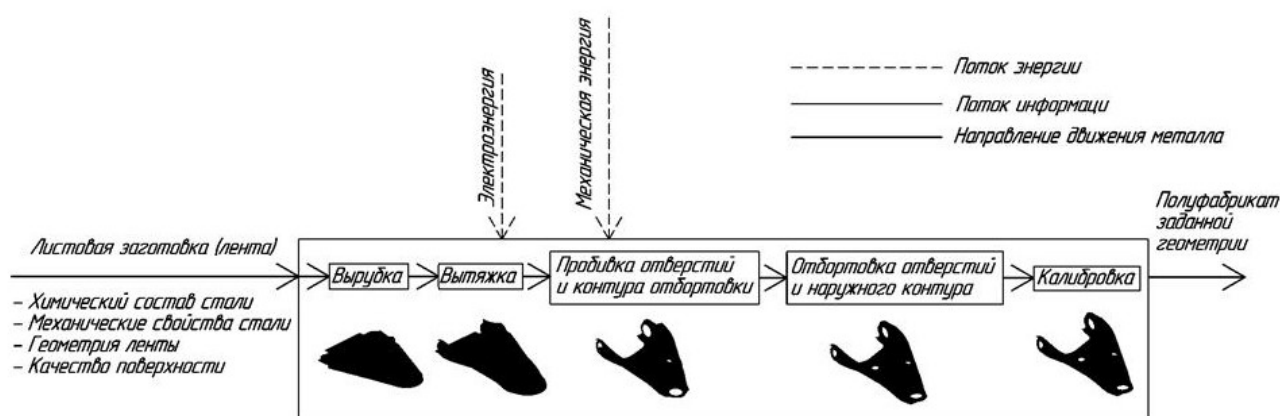


Рисунок 3 – Схема процесса холодной листовой штамповки детали подвески легкового автомобиля LADA LARGUS

Исходной заготовкой является стальной прокат, поставляемый в виде ленты в рулоне. Стальной прокат имеет определенный химический состав, механические свойства, шероховатость поверхности и геометрические размеры. Размотку осуществляют на правильно-разматывающих устройствах с шаговой подачей для обеспечения необходимой плоскостности листового проката и ритма операции вырубки. Скорость размотки зависит от необходимой производительности оборудования.

Далее листовой прокат подается в вырубной штамп, который установлен в прессе. Скорость движения пуансона зависит от характеристик используемого оборудования с учетом диапазона рекомендуемых скоростей вырубки для получения кромки необходимого качества. После операции вырубки оператор вручную (или с использованием робота) перемещает вырубленную заготовку заданной геометрии на следующую операцию - вытяжку. Вытяжка, как и последующая пробивка, отбортовка и калибровка также осуществляются на прессах. Однако формоизменяющие штампы для конструкции рычага передней подвески со сложной топологией поверхности спроектированы таким образом, чтобы за один ход пресса осуществлять формоизменение как в вертикальном, так в горизонтальном направлениях. Это осуществимо благодаря сложной конструкции направляющих штампов, имеющих трапецеидальные упоры. Для реализации процесса штамповки необходимо, чтобы на каждой из операций был задан определенный ритм штамповки, а также обеспечены определенные межоперационные запасы полуфабрикатов, чтобы в случае остановки оборудования на одной из последующих операций технологический процесс осуществлялся непрерывно.

Для того, чтобы данная технологическая система функционировала бесперебойно, необходимо обеспечить непрерывное прохождение потоков материала, энергии и информации по всей технологической цепочке последовательных операций. Данные технологические системы являются «открытыми», т.е. подпитываются потоками энергии и материала из окружающей среды.

На рисунке 4 схематично изображен процесс вырубки полуфабриката в прессах для дальнейшей обработки, так называемая подсистема «вырубка».

Лента в рулонах после размотки в правильно-разматывающем устройстве подается в штамп. Поток информации на данной операции представляет химический состав металла, его механические свойства, геометрия требуемой заготовки, качество поверхности исходной заготовки. На основании данной информации определяется необходимый режим вырубки. После этого задается скорость движения пуансона в прямом и обратном направлениях и, соответственно, время цикла. Пуансон приводится в движение потоком электрической энергии, которая преобразуется в механическую. Во время рабочего цикла производится контроль энергосиловых параметров процесса. В случае значительного превышения или занижения данных параметров подается светозвуковой сигнал, свидетельствующий о нестабильности процесса. После операции вырубки контролируемыми параметрами

полупродукта являются чистота поверхности и отсутствие загрязнений, контур вырубаемого полуфабриката и состояние его кромок.

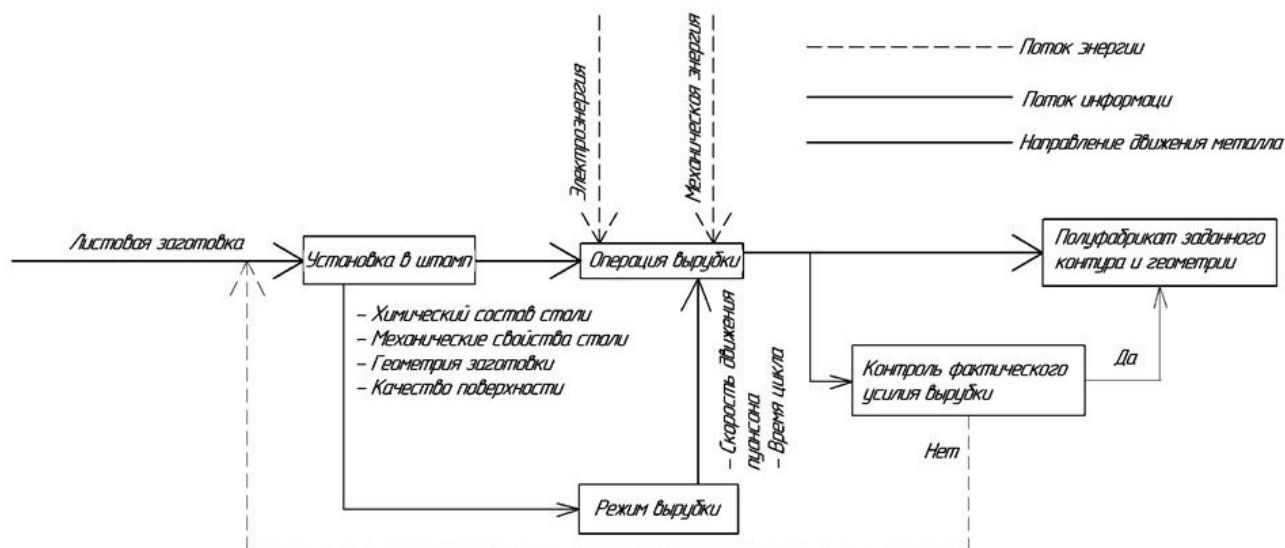


Рисунок 4 – Структурная схема подсистемы «вырубка»

Полуфабрикаты заданного контура и геометрии, являющиеся потоком материала для подсистемы «вытяжка» (рисунок 5), с необходимым видом кромки, геометрии и состоянием поверхности извлекаются из вырубного штампа и перемещаются вручную (или с помощью робота) дальше по технологической линии, а именно в штамп для осуществления операции «вытяжка».

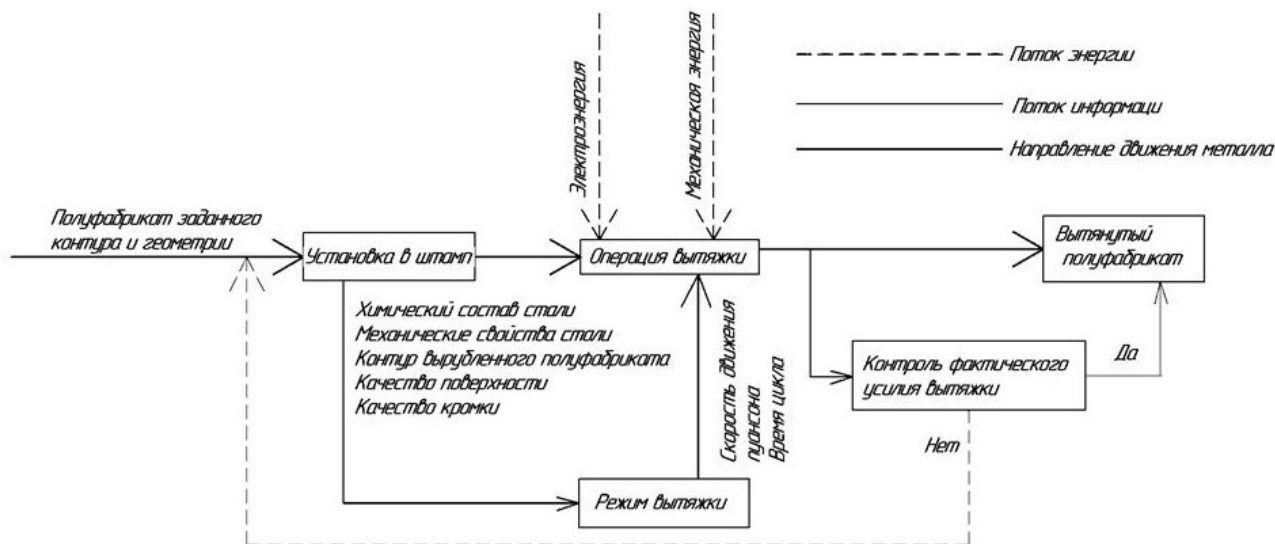


Рисунок 5 – Структурная схема подсистемы «вытяжка»

Информационный поток операции «вытяжка» аналогичен, что и для операции вырубки, но с дополнительной информацией о качестве поверхности и состоянии кромки. Это в свою очередь является исходными данными для определения режима вытяжки и формирования потока информации данной операции: скорость движения пуансона и время цикла.

Для последующих операций структурная схема не отличается значительным образом по своей структуре, изменяются лишь потоки материала на входе и выходе; поток информации

дополняется данными от предыдущих переходов. Структурные схемы операций «пробивка», «отбортовка» и «калибровка» представлены на рисунках 6, 7 и 8, соответственно.

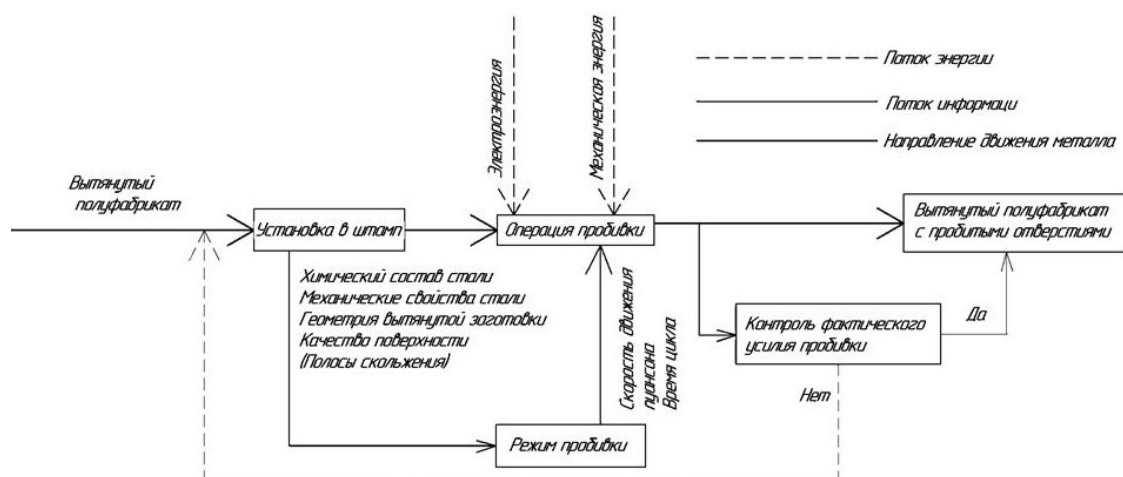


Рисунок 6 – Структурная схема операции «пробивка»

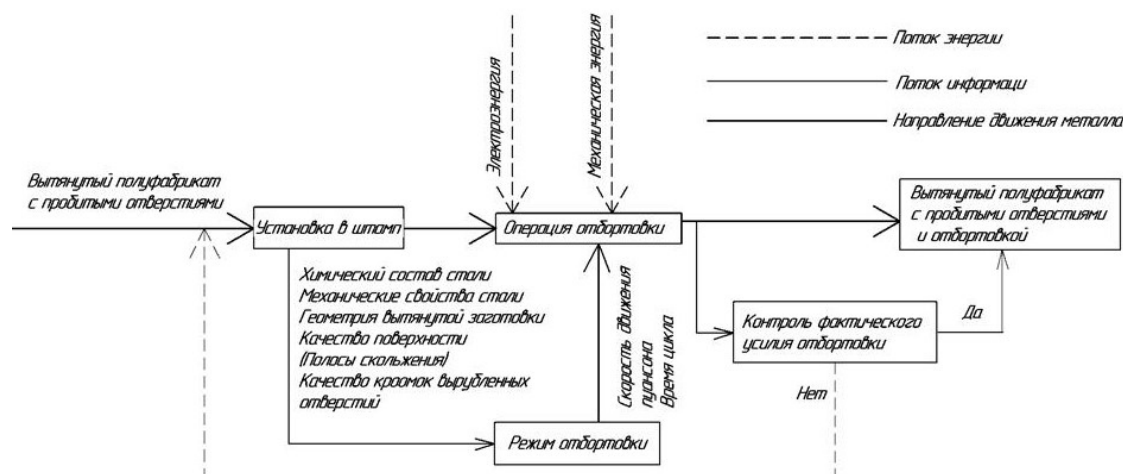


Рисунок 7 – Структурная схема операции «отбортовка»

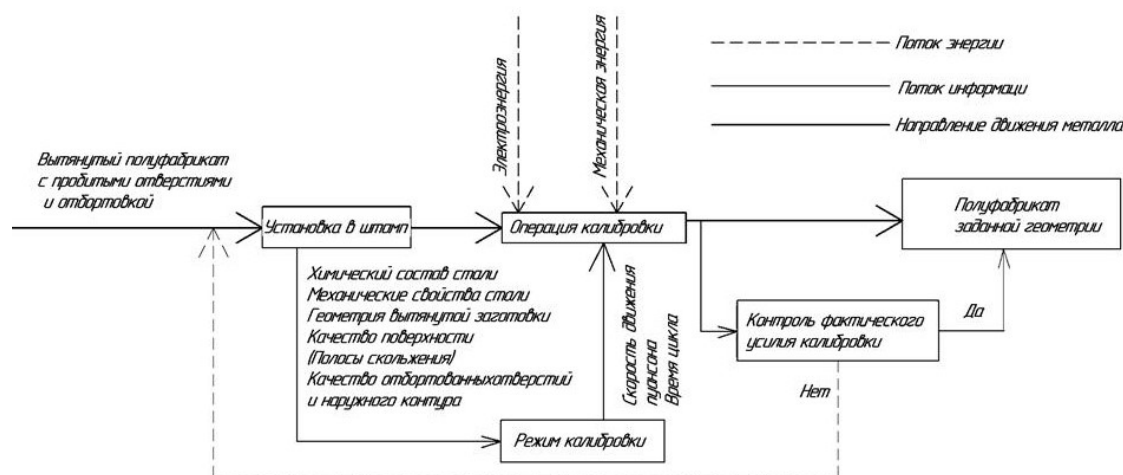


Рисунок 8 – Структурная схема операции «калибровка»

Системный анализ процесса холодной листовой штамповки рычага передней подвески автомобиля LADA LARGUS позволяет комплексно рассмотреть данный технологический процесс для установления взаимосвязи между отдельными технологическими операциями и оценить возможные направления взаимодействий между OEM-производителем и предприятиями других уровней. Так, поставщиками следующих уровней будут являться предприятия-производители металлопродукции, поставщики вспомогательных материалов. Кроме того, точность геометрических размеров и форма рычага подвески будет в значительной степени определяться качеством процесса конструирования штампа и точностью результатов моделирования процесса холодной листовой штамповки [16, 17]. Часть таких работ может быть проведена OEM-предприятиями других уровней.

Таким образом, специфика производства автомобильных компонентов является характерным примером эффективности работы и взаимодействия предприятий и организаций различной организационной структуры, в результате чего производится продукт с заданным уровнем качества.

### **Заключение**

Накопленный опыт в практике управления технологическими процессами свидетельствует, что, несмотря на значительный теоретический и практический опыт, накопленный в настоящее время в области холодной листовой штамповки, по-прежнему принятие правильных управленческих и технологических решений является сложной задачей. Системный анализ холодной листовой штамповки как процесса в целом, так и ее отдельных операций позволяет определить потоки материала, энергии и информации, а также существующие связи между ними при переходе от одной операции к другой. Использование такого подхода является основой для разработки математических моделей, адекватно описывающих происходящие преобразования вещества в ходе осуществления технологической операции. Полноценное владение такой информацией позволяет более эффективно организовывать управление производством для получения автомобильных компонентов заданного уровня качества.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Проблемы развития поставщиков: опыт российских производителей / Рубрика: круглый стол // Методы менеджмента качества. - 2019. - №7. - С. 16-21.
2. Biahmou, A. A Platform-based OEM-Supplier Collaboration Ecosystem Development. / A. Biahmou, T. Majic, J. Stjepandic, N. Wognum // In: Transdisciplinary Engineering for Complex Socio-technical Systems. 26th ISPE Inc. International Conference on Transdisciplinary Engineering. K. Hiekata et al. (Eds.). - 2019. - С. 436-445.
3. Kamala, V. Testing the S curve theory in OEM for lean operations: A study on organizational transformation / V. Kamala, V.M. Sunder, V.R. Sreedharan, G.L. Tortorella // IEEE Transactions on Engineering Management. - 2023. - С. 7930-7935.
4. Старцев, Ю.Н. S-образные модели развития и технологические разрывы / Ю.Н. Старцев // Вестник Челябинского государственного университета. - 2008. - №27. - С. 52-57.
5. Zhang, Yu. Innovation Dynamics between Original Equipment Manufacturers (OEMs) and Tier-1 Suppliers in the Automotive Industry / Yu. Zhang // Master of Science in Engineering and Management: Thesis. - Massachusetts Institute of Technology. - 2022. - 152 с.
6. Kennedy, K.J. An Evaluation of Technology Acquisition Via OEM Relationships / K.J. Kennedy, W.A. Brown // Engineering Management Journal. - 2015. - Vol. 2(4). - С. 3-12.
7. Liu, B. Development and application of magnesium alloy parts for automotive OEMs: A review / B. Liu, J. Yang, X. Zhang, Q. Yang, J. Zhang, X. Li // Journal of Magnesium and Alloys. - 2023. - Vol. 11. - С. 15-47.
8. Хубка, В. Теория технических систем: пер. с нем. / В. Хубка. - М.: Мир, 1987. - 208 с.
9. Аверьянов, А.М. Системное познание мира / А.М. Аверьянов. - М.: Политиздат, 1985. - 263 с.
10. Берталанфи, Л. фон. История и статус общей теории систем / Л. фон Берталанфи // Системные исследования. Ежегодник. - М.: Наука, 1973. - С. 20 - 37.
11. Рябинин, И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем / И.А. Рябинин. - Санкт-Петербург: Политехника, 2000. - 248 с.
12. Васильев, С.Н. К интеллектуальному управлению / С.Н. Васильев // Нелинейная теория управления и ее приложения. - М.: Физматлит, 2000. - С. 57-126.
13. Шлеер, С. Объектно-ориентированный анализ: моделирование мира в состояниях: пер. с англ. / С. Шлеер, С. Меллор. - Киев: Диалектика, 1993. - 240 с.

14. Ширяева, Е.Н. Анализ взаимосвязей технических систем на иерархически связанных уровнях производства стального листа горячей прокаткой / Е.Н. Ширяева, М.А. Полякова, Д.В. Терентьев // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. - 2020. - Т. 76. - № 8. - С. 847-855.

15. Полякова, М.А. Особенности вещественных, энергетических и информационных потоков в технологической системе «горячее цинкование стального проката» / М.А. Полякова, О.В. Седлецкая // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. - 2023. - Выпуск 3. - С. 539-547.

16. Гун, И.Г. Расчетное определение усилия начала пластической деформации при изгибе пальца шарового наружного рулевого наконечника автомобиля посредством моделирования процесса статических испытаний / И.Г. Гун, А.Р. Вахитов, Ф.А. Столяров, А.В. Смирнов, И.А. Михайловский // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. - 2021. - Т. 19. - № 2. - С. 23-31.

17. Столяров, Ф.А. Определение граничных условий конечно-элементного моделирования процесса холодной листовой штамповки / Ф.А. Столяров, И.А. Михайловский, М.А. Полякова // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы 80-й международной научно-технической конференции. Том 1. - Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2022. - С. 201-202.

**Полякова Марина Андреевна**

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,  
г. Магнитогорск

Доктор технических наук, доцент

Профессор кафедры технологий обработки материалов

455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38

E-mail: m.polyakova@magtu.ru

**Гун Игорь Геннадьевич**

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,  
г. Магнитогорск

Доктор технических наук, профессор

Профессор кафедры технологии, сертификации и сервиса автомобилей

455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38

E-mail: goun@belmag.ru

**Голубчик Эдуард Михайлович**

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,  
г. Магнитогорск

Доктор технических наук, доцент

Профессор кафедры технологий обработки материалов

455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38

E-mail: e.golubchik@magtu.ru

**Столяров Федор Алексеевич**

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,  
г. Магнитогорск

Аспирант кафедры технологии, сертификации и сервиса автомобилей

455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38

E-mail: stolyarov.f.a@yandex.ru

M.A. POLYAKOVA, I.G. GUN, E.M. GOLUBCHIK, F.A. STOLYAROV

## INTERACTION OF MANUFACTURERS AS A BASIS TO DESIGN TECHNOLOGICAL SYSTEMS FOR THE MANUFACTURING OF AUTOMOTIVE COMPONENTS

**Abstract.** The article is devoted to a system analysis of the cold sheet stamping process as the method for the manufacturing of a front suspension arm for a passenger car. The analysis can be used to organize interaction between the parent OEM-enterprise that produces auto components and its suppliers at other levels.

**Keywords:** system analysis, technological system, cold sheet stamping, automotive component, manufacturer, organization of manufacturing.

### BIBLIOGRAPHY

1. Problemy razvitiya postavshchikov: opyt rossijskih proizvoditelej / Rubrika: kruglyj stol // Metody Menedzhmenta Kachestva. - 2019. - №7. - S. 16-21.

2. Biahmou, A. A Platform-based OEM-Supplier Collaboration Ecosystem Development. / A. Biahmou, T. Majic, J. Stjepandic, N. Wognum // In: Transdisciplinary Engineering for Complex Socio-technical Systems. 26th ISPE Inc. International Conference on Transdisciplinary Engineering. K. Hiekata et al. (Eds.). - 2019. - S. 436-445.

3. Kamala, V. Testing the S curve theory in OEM for lean operations: A study on organizational transformation / V. Kamala, V.M. Sunder, V.R. Sreedharan, G.L. Tortorella // IEEE Transactions on Engineering Management. - 2023. - S. 7930-7935.

4. Starcev, Yu.N. s-obraznye modeli razvitiya i tekhnologicheskie razryvy / Yu.N. Starcev // Vestnik Chelyabinskogo Gosudarstvennogo Universiteta. - 2008. - №27. - S. 52-57.



5. Zhang, Yu. Innovation Dynamics between Original Equipment Manufacturers (OEMs) and Tier-1 Suppliers in the Automotive Industry / Yu. Zhang // Master of Science in Engineering and Management: Thesis. – Massachusetts Institute of Technology. - 2022. – 152 s.
6. Kennedy, K.J. An Evaluation of Technology Acquisition Via OEM Relationships / K.J. Kennedy, W.A. Brown // Engineering Management Journal. – 2015. – Vol. 2(4). – S. 3-12.
7. Liu, B. Development and application of magnesium alloy parts for automotive OEMs: A review / B. Liu, J. Yang, X. Zhang, Q. Yang, J. Zhang, X. Li // Journal of Magnesium and Alloys. – 2023. – Vol. 11. – S. 15–47.
8. Hubka, V. Teoriya tekhnicheskikh system: per. s nem // V. Hubka. - M.: Mir, 1987. - 208 s.
9. Averyanov, A.M. Sistemnoe poznanie mira // A.M. Averyanov. - M.: Poliizdat, 1985. - 263 s.
10. Bertalanfi, L. fon. Istoriya i status obshchej teorii system / L. fon Bertalanfi // Sistemnye issledovaniya. Ezhegodnik. - M.: Nauka, 1973. - S. 20 - 37.
11. Ryabinin, I.A. Nadezhnost i bezopasnost strukturno slozhnykh system / I.A. Ryabinin. - Sankt-Peterburg: Politehnika, 2000. - 248 s.
12. Vasilev, S.N. K intellektualnomu upravleniyu / S.N. Vasilev // Nelinejnaya teoriya upravleniya i ee prilozheniya. - M.: Fizmatlit, 2000. - S. 57-126.
13. Shleer, S. Obektno-orientirovannyj analiz: modelirovanie mira v sostoyaniyah: per. s angl. // S. Shleer, S. Mellor. - Kiev: Dialektika, 1993. - 240 s.
14. Shiryayeva, E.N. Analiz vzaimosvyazey tekhnicheskikh system na ierarhicheski svyazannykh urovnnykh proizvodstva stalnogo lista goryachej prokatkoj / E.N. Shiryayeva, M.A. Polyakova, D.V. Terentev // Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tekhnicheskoy i ehkonomicheskoy informacii. - 2020. - T. 76. - № 8. - S. 847-855.
15. Polyakova, M.A. Osobennosti veshchestvennykh, ehnergeticheskikh i informacionnykh potokov v tekhnologicheskoy sisteme «goryachee cinkovanie stalnogo prokata» // M.A. Polyakova, O.V. Sedleckaya // Izvestiya Tulsogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. - 2023. - Vypusk 3. - S. 539-547.
16. Gun, I.G. Raschetnoe opredelenie usiliya nachala plasticheskoy deformacii pri izgibe palca sharovogo naruzhnogo rulevogo nakonechnika avtomobilya posredstvom modelirovaniya processa staticheskikh ispytaniy // I.G. Gun, A.R. Vahitov, F.A. Stolyarov, A.V. Smirnov, I.A. Mihajlovskij // Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova. - 2021. - T. 19. - № 2. - S. 23-31.
17. Stolyarov, F.A. Opredelenie granichnykh uslovij konechno-ehlementnogo modelirovaniya processa holodnoj listovoj shtampovki // F.A. Stolyarov, I.A. Mihajlovskij, M.A. Polyakova // Aktualnye problemy sovremennoj nauki, tekhniki i obrazovaniya: tezisy 80-j mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii. Tom 1. – Magnitogorsk: Magnitogorskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet im. G.I. Nosova, 2022. - S. 201-202.

**Polyakova Marina Andreevna**

Nosov Magnitogorsk State Technical University,  
Magnitogorsk  
Doctor of Science (Engineering), Associate professor  
Professor of the Department of Material Processing  
455000, Magnitogorsk, Lenin Avenue, 38  
E-mail: m.polyakova@magtu.ru

**Golubchik Eduard Mikhailovich**

Nosov Magnitogorsk State Technical University,  
Magnitogorsk  
Doctor of Science (Engineering), Associate professor  
Professor of the Department of Material Processing  
455000, Magnitogorsk, Lenin Avenue, 38  
E-mail: e.golubchik@magtu.ru

**Gun Igoe Gennadievich**

Nosov Magnitogorsk State Technical University,  
Magnitogorsk  
Doctor of Science (Engineering), Professor  
Professor of the Department of Car Technology,  
Certification and Service  
455000, Magnitogorsk, Lenin Avenue, 38  
E-mail: gown@belmag.ru

**Stolyarov Fedor Alekseevich**

Nosov Magnitogorsk State Technical University,  
Magnitogorsk  
Postgraduate student of the Department of Car  
Technology, Certification and Service  
455000, Magnitogorsk, Lenin Avenue, 38  
E-mail: stolyarov.f.a@yandex.ru

© М.А. Полякова, И.Г. Гун, Э.М. Голубчик, Ф.А. Столяров, 2024

В.В. СИДОРИН, Н.Б. ХАЛИЛЮЛИНА

## МОДЕЛЬ И МЕТОД ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ПРОЕКТА

**Аннотация.** В статье представлены модель и метод расчёта обобщённого показателя результативности проекта по трём его ключевым параметрам - полученному результату, своевременности и затратам ресурсов на выполнение работ по проекту. Основное достоинство метода – его инвариантность, независимость от вида проектной деятельности - научно-исследовательской или опытно-конструкторской работы, от цели и вида работ по проекту. Универсальность метода, единство подходов к оценке различных вариантов реализации проекта создаёт условия для принятия решения при их выборе всеми участниками работ по проекту. Оценка результативности проекта предложенным методом даёт возможность обмениваться данными оценки между организациями, заказчиками и исполнителями по всей цепи поставок при создании сложной наукоёмкой высокотехнологичной продукции. Метод обеспечивает возможность сравнения различных проектов по их результативности и выбора оптимального подхода к решению поставленной задачи. Особое значение оценка результативность предложенным методом имеет в управлении комплексными научно-исследовательскими и опытно конструкторскими работами, выполняемыми различными организациями, объединёнными общей целью.

**Ключевые слова:** проект, результативность, научно-исследовательская работа, опытно-конструкторская работа, векторная трехмерная модель, обобщённый показатель результативности, уникальный результат, сроки выполнения, ресурсы.

### Постановка задачи

Отличия и особенности проектной деятельности от операционной состоят в получении впервые нового уникального результата ограниченными ресурсами в ограниченные сроки [1-3]. Результатами проекта в зависимости от его целей могут быть новые изделия, методы, услуги, новые знания, информация, технико-экономический, социальный или какой-либо иной эффект в различных видах деятельности.

Наиболее распространённые виды проектной деятельности при создании и применении наукоёмкой высокотехнологичной продукции в организациях оборонно-промышленного комплекса - научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, аванпроекты (НИР, ОКР, АП). Методология управления этими видами проектной деятельности - стандарты Системы разработки и постановки продукции на производство (СРПП) [4,5]. Специфические особенности управления созданием новых образцов вооружения и военной техники учтены стандартами Системы разработки и постановки продукции на производство военной техники (СРПП ВТ), Комплексной системы общих технических требований (КСОТТ), Комплексной системы контроля качества (КСКК) и рядом других комплексов стандартов [6-8]. Формализованный международными и национальными стандартами Российской Федерации опыт управления проектами, выполнением НИР и ОКР, основан на процессном подходе [9-12]. Достижение цели проекта, получение выхода, соответствующего установленным требованиям, обеспечивается методами и средствами управления всеми составляющими проекта. Это и методы планирования, менеджмента рисков, управления изменениями и персоналом проекта, исследовательскими и экспериментальными работами, ресурсами и сроками выполнения работ, поставщиками, соисполнителями.

Проект как процесс, в котором входы преобразуются в требуемые потребителем выходы, всесторонне и полно оценивается по результативности и эффективности совокупности всех действий по проекту. Результативность, т.е. степень реализации запланированной деятельности и достижения запланированных результатов [9] оценивается методами, которые в наибольшей степени соответствуют установленным показателям результативности в каждом проекте и в отдельных его этапах. Выбор показателей результативности наиболее чувствительных к влияющим факторам на действия и работы по проекту позволяет рассматривать и применять оценку результативности в качестве управляющего параметра в управлении проектом на всех его этапах, используя для этого технологии менеджмента рисков, предупреждающие действия, управление изменениями, корректирующие действия. Эффективность как соотношение между достигнутым

результатом и использованными ресурсами [9] подводит итоги выполненных работ, учесть которые, принять и реализовать решения по которым представляется возможным только уже в последующих проектах.

В основе количественной оценки результативности - измерительная информация о параметрах проекта с последующими вычислениями показателей результативности дифференциальными, комплексными или интегральными методами [13-15]. Качественная оценка выполняется экспертными методами в результате анализа, как измерительной информации, так и данных мониторинга и аудита выполняемых процессов по проекту [16-18].

Актуальной проблемой в настоящее время является необходимость выбора оптимального из нескольких возможных вариантов проектных решений, что требует предварительной сравнительной их оценки на предконтрактном этапе. Известные методы количественной и качественной оценки результативности проектов не позволяют дать такую оценку из-за отсутствия единых показателей (показателя) результативности для различных процессов, метода и методики их определения и сравнения. Ряд известных методов и подходов основан на оценке и прогнозировании экономической эффективности проекта для принятия решения о целесообразности его выполнения. Однако принятие решения по критерию экономической эффективности заведомо исключает возможность постановки и выполнения ряда проектов, цель которых - разработка новых образцов вооружения и военной техники, решение задач импортозамещения, защиты информации, обеспечения безопасности продукции и производственных процессов [19-21].

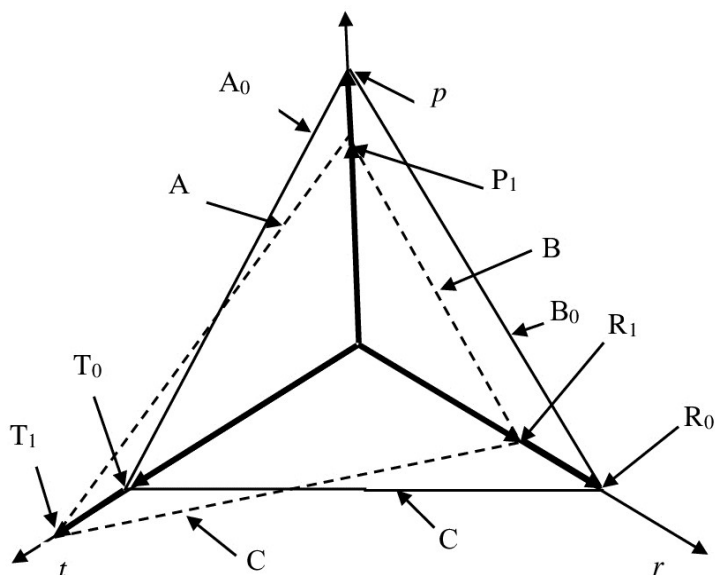
Для принятия решения о постановке и управлении такими проектами необходим метод, критерий результативности которого объединит в себе основные параметры проекта – уникальность создаваемого продукта проекта, ресурсоёмкость и своевременности выполнения. Результаты разработки такого показателя результативности проекта, НИР или ОКР и метода его определения представлены в настоящей статье.

### **Показатели результативности проекта и его этапов**

Отличительные признаки проекта - полученный впервые новый уникальный продукт – планируемый выход проекта, ограниченные ресурсы и сроки выполнения являются также и показателями его результативности. Оценка отдельных составляющих и этапов проекта по каждому из этих параметров представляет собой оценку трёх различных аспектов проектной деятельности дифференциальным методом, но не даёт общей комплексной его оценки и возможности сравнения с другими проектами или с альтернативными подходами к выполнению проекта. Известный в квалиметрии комплексный метод основан на оценке объекта оценивания по его комплексному показателю, представляющему собой усреднённую сумму отдельных показателей с их весовыми коэффициентами. Недостаток такой оценки – в невозможности сравнения на основе полученной оценки различных проектов, организационно-технических и технологических решений в них, этапов проекта. Преодолеть этот недостаток позволит оценка результативности обобщённым показателем, объединяющим в себе три параметра каждого проекта. Это уникальность результата проекта, ресурсы, необходимые для достижения целей проекта и сроки выполнения работ по проекту. Объединить три независимых параметра проекта в обобщённый показатель результативности (ОПР) позволяет его векторная трёхкоординатная модель (рисунок 1). Направление и размер каждого из трёх частных показателей результативности наиболее полно и всесторонне характеризует и описывает три аспекта проектной деятельности. Различные направления векторов моделируют взаимную независимость наиболее значимых параметров и свойств проекта, а их количественные показатели – их размер.

Такой обобщённый показатель результативности проекта и его этапов представляет собой трёхмерную векторную модель, объединяющую частные показатели результативности трёх ключевых параметров проекта:  $\bar{P}$  - показатель результативности по параметру «уникальный продукт (или уникальный результат) проекта»,  $\bar{T}$  - показатель результативности по срокам выполнения проекта;  $\bar{R}$  - показатель результативности использование ресурсов на выполнение работ по проекту. Результативность проекта по срокам выполнения – степень близости сроков выполнения работ по проекту и его этапам к их запланированным значениям.

Аналогично, результативность использования ресурсов при выполнении проекта представляет собой соотношение между затраченными ресурсами при выполнении проекта и их запланированными значениями, установленными в тактико-технических (технических) заданиях. По соотношению достигнутых целей проекта и использованными ресурсами оценивается эффективность проекта. Таким образом, по результативности и эффективности проект оценивается всесторонне и полно.



*Рисунок 1 - Векторная модель комплексной оценки результативности проекта*

По каждому из этих показателей в отдельности и обобщённому показателю оценивается результативность как проекта в целом, так и каждого из его этапов – от согласования и утверждения технического задания до сдачи-приёмки проекта заказчику. Критериями результативности являются установленные требования к проекту. По результатам поэтапной оценки результативности проводится GAP-анализ и принимаются управленческие решения с целью поддержания стабильного управляемого состояния выполнения всех видов работ по процессу. Показатели результативности являются в процессах управления проектом исходными данными для анализа и деятельности по достижению целей проекта.

Единичные или комплексный показатель результативности по параметру «уникальный продукт (или уникальный результат) проекта  $\bar{P}$ » различны для проекта в целом и для каждого из его этапов. Условие их выбора для оценки результативности – информативность признаков уникальности. Каждый из показателей представляет собой отношение значения величины, характеризующей уникальность полученного результата к запланированным их значениям.

Показателями уникальности продукта проекта могут быть: новое свойство, дополнительные или улучшенные функции результата разработки, значения ключевого или интегрального параметра, превосходящего аналоги и прототип, достигнутый мировой уровень, новые принципы функционирования, исследования, конструирования или технологии производства и др. Параметр уникальности проекта  $P$  и параметр использования ресурсов  $R$  в общем случае комплексные, каждый из которых может состоять из нескольких параметров, наиболее полно их определяющих. В случае оценки результативности проекта, НИР или ОКР критериальные значения показателей результативности  $P_0$ ,  $T_0$  и  $R_0$  – это установленные в техническом задании значения соответствующих показателей – показатели уникальности разработки, установленная продолжительность выполнения работ, установленный объём материальных, финансовых или других видов ресурсов необходимых для выполнения работ по проекту.

Показатель результативности по срокам выполнения проекта в целом и по каждому из этапов проекта, или отдельным его работам  $\bar{T}$  – отношение продолжительности выполненных действий для достижения цели в оцениваемом объекте к плановым их значениям. В отличие

от других показателей характеристик повышения результативности для этого показателя является уменьшение его значения относительно планового значения.

Для выполнения проекта необходимы ресурсы различные по виду, значимости, объёму, источникам получения – материальные, финансовые, людские, информационные и ряд других. Согласно ГОСТ Р ИСО 9001-2015 структура ресурсов в системе менеджмента качества организации для каждого из проектов и процессов в них универсальна. В её составе 12 видов ресурсов необходимых для каждой процедуры, процесса, проекта в целом. Вместе с этим каждый процесс и выполняемые в них процедуры, работы уникальны по своим целям, содержанию и составу выполняемых работ, технологиям, методам, средствам, исполнителям и другим отличительным признакам. Комплексный показатель оценки совокупности ресурсов всех видов требуемых для выполнения работ по проекту и на его отдельных этапах определяется методом, представленным в работах [23-24]. По рациональности планирования и использования ресурсов проекты в целом и их отдельные этапы существенно отличаются ввиду влияния различных факторов. Основные из них – эффективность планирования, включая в т.ч. возможные риски, компетентность исполнителей, предшествующий опыт, эффективность бенчмаркинга, маркетинговых исследований и патентного поиска, анализа состояния в области планируемых работ и ряд других. В общем случае результативность использования ресурсов на выполнение работ по проекту по предлагаемой модели оценивается безразмерным комплексным показателем  $\bar{R}$  – отношением комплексного (или отдельных наиболее информативных единичных показателей) к их плановым значениям.

#### Модель и метод оценки обобщённого показателя результативности проекта

Геометрическая модель трёхмерного обобщённого показателя результативности для оценки проекта по трем различным его параметрам представляет собой площадь треугольника в прямоугольной системе координат, каждая из осей которой  $p$ ,  $r$  и  $t$  является шкалой для трех показателей, характеризующих процесс:  $\bar{P}$ ,  $\bar{T}$  и  $\bar{R}$ . Стороны треугольника образуются линиями, соединяющими между собой точки на осях системы координат, соответствующие количественным значениям каждого из трёх частных показателей результативности  $\bar{P}$ ,  $\bar{T}$  и  $\bar{R}$ .

Значения  $P_0$ ,  $T_0$  и  $R_0$  показателей результативности – базовые. Они соответствуют установленным требованиям к основному результату проекта, срокам и ресурсам для его выполнения. Вершины треугольника  $P_0$ ,  $T_0$  и  $R_0$  – значения целевых показателей результативности параметров проекта на соответствующих осях с соединяющими их сторонами (сплошные линии на рисунке 1). Они ограничивают треугольник, площадь которого  $S_0$  представляет собой критерий результативности проекта по обобщённому показателю:

$$S_0 = \sqrt{N_0(N_0 - A_0)(N_0 - B_0)(N_0 - C_0)} = \sqrt{\frac{3}{2}}, \quad (1)$$

где  $N_0 = \frac{1}{2}(A_0 + B_0 + C_0)$  – полупериметр треугольника со сторонами  $A_0$ ,  $B_0$ ,  $C_0$ , соединяющими его вершины, каждая из которых определяется из следующих соотношений:

$$A_0 = \sqrt{P_0^2 + T_0^2} = \sqrt{2}; B_0 = \sqrt{P_0^2 + R_0^2} = \sqrt{2}; C_0 = \sqrt{T_0^2 + R_0^2} = \sqrt{2},$$

в которых  $P_0 = R_0 = T_0 = 1$  – критериальные значения показателей результативности по каждому из трёх параметров проекта в относительных безразмерных единицах измерения, нормированные к значениям соответствующих заданных требований к ним.

В общем случае оцениваемый результат проекта, соответствующий площади треугольника со сторонами  $A, B, C$  определяется аналогично по формуле:

$$S = \sqrt{N(N - A)(N - B)(N - C)} \quad (2)$$

где  $N = \frac{1}{2}(A + B + C)$  – полупериметр треугольника со сторонами  $A, B, C$ , соединяющими его вершины, каждая из которых определяется из следующих соотношений:

$$A = \sqrt{\bar{P}^2 + \bar{T}^2}; B = \sqrt{\bar{P}^2 + \bar{R}^2}; C = \sqrt{\bar{R}^2 + \bar{T}^2}, \quad (3)$$

в которых;  $\bar{P} = P/P_0$ ;  $\bar{R} = R/R_0$ ;  $\bar{T} = T/T_0$  - достигнутые показатели результативности по каждому из трёх параметров проекта, нормированные к их базовым значениям.

В тех случаях, когда значения затраченных ресурсов и времени на выполнение работ по проекту превышают их запланированные значения, это соответствует снижению результативности пропорционально превышению значения параметра относительно установленного норматива. Нормированные значения показателей результативности по этим параметрам в этом случае вычисляются по следующим формулам:

$$\bar{R} = 1 - \left( \frac{R}{R_0} - 1 \right); \bar{T} = 1 - (T/T_0 - 1) \quad (4)$$

Формула для расчёта обобщённого показателя результативности проекта  $F$ , определяется как отношение результата проекта к критериальному его значению, т.е. площади  $S$  треугольника со сторонами  $A$ ,  $B$  и  $C$  к площади треугольника  $S_0$ , и с учётом (1) и (4) принимает вид:

$$F = \frac{S}{S_0} = \frac{1}{2\sqrt{3}} \sqrt{N(N-A)(N-B)(N-C)} \quad (5)$$

Трёхвекторный обобщённый показатель результативности проекта и его этапов, процессов, процедур, действий исполнителей учитывает и даёт возможность оценить влияние каждого из трёх ключевых параметров проекта на достижение поставленных целей: по уникальности полученного продукта проекта, по рациональности использования ресурсов, по срокам выполнения работ по проекту. Вместе с этим он определяет необходимое единство и взаимосвязь трех составляющих обобщённого показателя результативности, являющихся условием и возможностью выполнения работ, процессов по проекту. Обобщённый показатель оценивает результативность не только выходов проекта, но и результативность планирования, установления временных показателей, структуры и объёма ресурсов, эффективности методов достижения поставленных целей проекта.

#### Методика оценки результативности проекта по обобщённому показателю

Реализация метода оценки результативности проекта по обобщённому показателю включает выполнение последовательности действий как в отношении проекта в целом, так и в отношении каждого из его этапов (рисунок 2). Процедуры и их последовательность идентичны для различных объектов оценки, а отличия – заключаются в критериях принятия решений, принимаемых решениях и действиях по их реализации. Цель оценки результативности каждого этапа и проекта в целом – оптимизация решений по управлению и достижению цели проекта.

Получение данных о проекте и/или его этапах в зависимости от конкретного объекта оценки и его результатов требует различных для сбора данных методов и средств. Это и информация, содержащаяся в соответствующей документации, техническом задании, ведомостях, протоколах испытаний, актах сдачи приёмки, и результаты расчётов, анализа, экспертные оценки, другие исходные данные. Они могут быть получены различными способами и средствами: на бумажных и/или электронных носителях, автоматизированными средствами получения – датчиками, информационными системами. Исходные данные могут получаться непрерывно, периодически или по мере поступления информации из различных источников внешнего и внутреннего происхождения, из сформированной специально для целей управления проектом базы данных.

Из всей совокупности данных выбираются или формируются комплексные параметры, наиболее полно характеризующие проект – уникальный его результат, сроки его выполнения и используемые ресурсы. Для каждого из них с учётом документации по проекту, данных о аналогах и прототипах устанавливаются критериальные значения  $P_0, R_0, T_0$  и вычисляются значения сторон  $A_0, B_0, C_0$  критериального треугольника и его площадь  $S_0$  – критерий обобщённого показателя результативности.

По реально достигнутым показателям проекта по формулам (2) - (4) вычисляются нормированные значения параметров проекта  $\bar{P}, \bar{R}, \bar{T}$  и обобщённый результат проекта и/или его этапов – эквивалентный площади треугольника  $S$  со сторонами  $A, B, C$ .

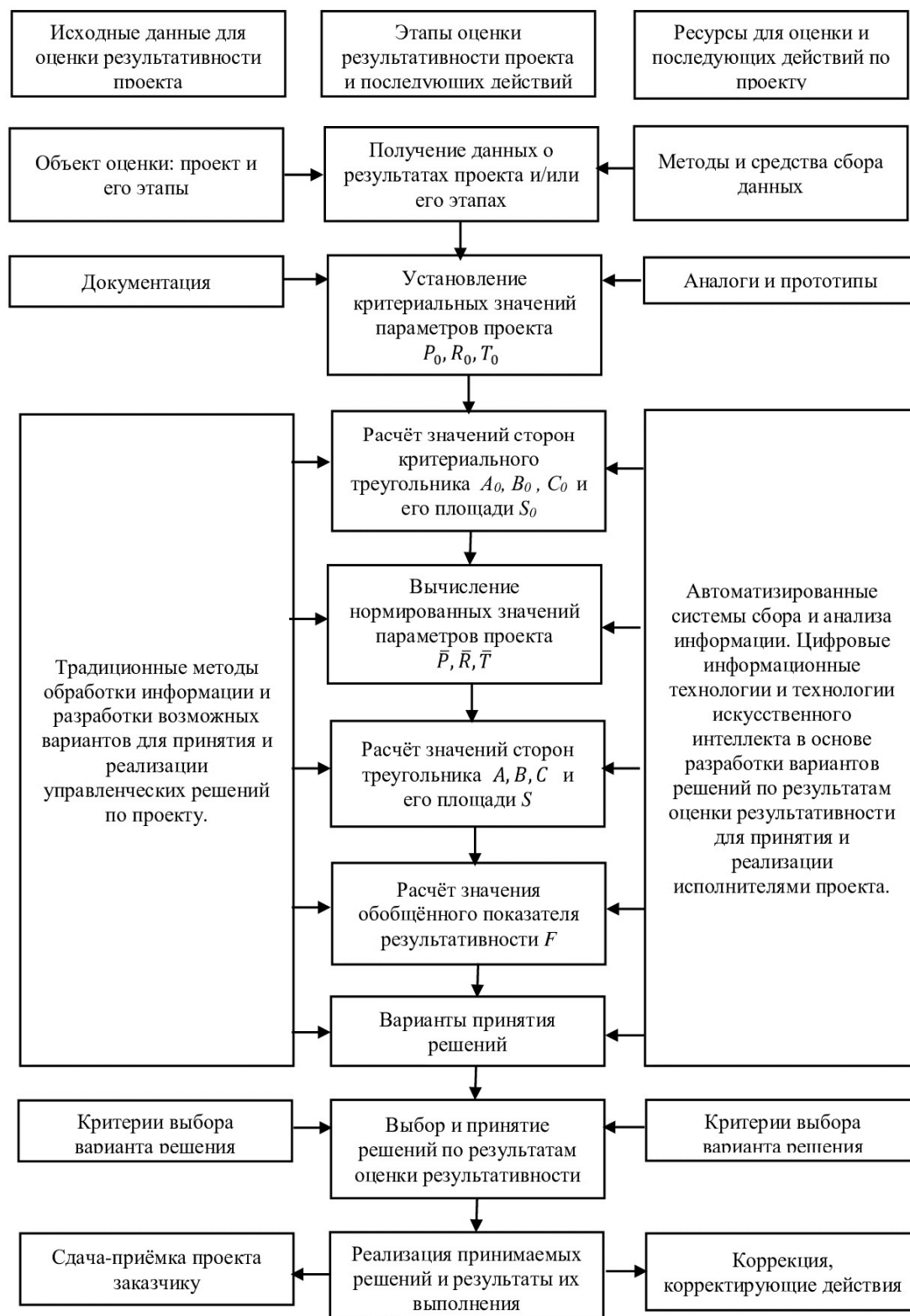


Рисунок 2 - Алгоритм оценки результативности проекта и последующих действий для достижения цели проекта

Для вычислений могут быть использованы как традиционные ручные методы обработки информации с минимальным обращением к средствам вычислительной техники для случаев с небольшим объёмом обрабатываемых данных, так и автоматизированные системы сбора и анализа информации в случае большого объёма информации о проекте.

Значение обобщённого показателя результативности проекта  $F$  или его этапов рассчитывается по формуле (5) как отношение обобщённого результата проекта  $S$  к его критериальному значению  $S_0$ .

Для разных уровней результативности проекта и его этапов разрабатываются соответствующие возможные варианты принятия решений. Для этого могут быть использованы такие известные методы и их сочетание как мозговой штурм, метод номинальной группы, структурированные интервью, метод Дельфи и ряд других. Более перспективным представляется применение цифровых информационных технологий и технологий искусственного интеллекта для анализа, разработки и оптимизации вариантов решений по результатам оценки результативности для последующего принятия и реализации их исполнителями проекта [25-28].

Последующие действия по управлению проектом и достижению его цели – сдача и приёмка проекта заказчику при удовлетворяющем его уровне результативности проекта, или разработка и выполнение коррекций и/или корректирующих действий с целью повышения результативности проекта до приемлемого уровня. Итерационный подход к коррекциям и/или корректирующим действиям на этапах проекта обеспечивает его результативность.

### Заключение

Представленные модель и метод оценки результативности проекта, НИР, ОКР, АП по обобщённому показателю могут быть инструментами первого этапа в управлении проектом как процессом, переходящего в последующие: управление рисками, мониторинг, управление эффективностью как соотношением достигнутых результатов и использованных ресурсов, управление изменениями, GAP-анализ.

Основное достоинство метода – его инвариантность, независимость от вида проектной деятельности - научно-исследовательской или опытно-конструкторской работы, от цели и вида работ по проекту. Универсальность метода, единство подходов к оценке различных вариантов реализации проекта создаёт условия для принятия решения при их выборе всеми участниками работ по проекту. Оценка результативности проекта предложенным методом даёт возможность обмениваться данными оценки между организациями, заказчиками и исполнителями по всей цепи поставок при создании сложной наукоёмкой высокотехнологичной продукции. Метод обеспечивает возможность сравнения различных проектов по их результативности и выбора оптимального подхода к решению поставленной задачи. Особое значение оценка результативность предложенным методом имеет в управлении комплексными научно-исследовательскими и опытно конструкторскими работами, выполняемыми различными организациями, объединёнными общей целью. В отличие от известных методов оценки на основе экономической эффективности проекта, представленный метод даёт оценку проекту по трёхвекторной модели обобщённого показателя результативности, объединяющей в себе показатели уникальности проекта, ресурсоёмкости и своевременности реализации как эффективности планирования работ по проекту. Такой подход в основе принимаемых решений при планировании, выполнении и сдаче-приёмке проекта позволит обоснованно оценивать результаты проектирования и разработки новых образцов продукции военного назначения. Возможность применения метода на всех стадиях жизненного цикла проекта открывает перспективы его применения в качестве эффективного инструмента управления при проектировании и разработке новой наукоёмкой высокотехнологичной продукции в различных отраслях экономики.

На основе полученной оценки результативности GAP-анализ в управлении проектом позволяет оценить:

- несоответствия между запланированными требованиями к проекту и полученными результатами на каждом этапе и по проекту в целом;
- удовлетворённость заказчика результатами разработки, методами выполнения проекта и затратами на его выполнение;
- возможные варианты управленческих решений для приведения работ по проекту в соответствие с установленными целями.



Выявленные несоответствия результатов установленным требованиям структурируются для идентификации причин и мест их возникновения при выполнении работ по проекту, разработки плана работ по их устранению. А по соотношению полученного в проекте результата и затраченных ресурсов на его достижение может быть дана оценка его эффективности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р ИСО 10006-2019 Менеджмент качества. Руководящие указания по менеджменту качества в проектах. М.: ФГУП «Стандартинформ». 2019 г. 32 с.
2. ГОСТ Р 54869-2011 Проектный менеджмент. Требования к управлению проектом. М.: ФГУП «Стандартинформ». 2012 г. 8 с.
3. ГОСТ Р ИСО 21500-2014 Руководство по проектному менеджменту. М.: ФГУП «Стандартинформ». 2015 г. 46 с.
4. ГОСТ Р 15.101-2021 Система разработки и постановки продукции на производство. Порядок выполнения научно-исследовательских работ. М.: ФГБУ «РСТ». 2021 г. 14 с.
5. ГОСТ Р 15.000-2016 Система разработки и постановки продукции на производство. Основные положения. М.: ФГУП «Стандартинформ». 2016 г. 16 с.
6. ГОСТ РВ 15.105-2021 Военная техника. Порядок выполнения научно-исследовательских работ и их составных частей. Основные положения. М.: ФГБУ «РСТ» 2021 г. 30 с.
7. ГОСТ РВ 15.103-2004 Система разработки и постановки продукции на производство. Военная техника. Порядок выполнения аванпроекта и его составных частей. Основные положения. М.: Стандартинформ. 2005 г. 41 с.
8. ГОСТ РВ 15.203-2001 Система разработки и постановки продукции на производство. Военная техника. Порядок выполнения опытно-конструкторских работ по созданию изделий и их составных частей. Основные положения. М.: 2001. 130 с.
9. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. М.: Стандартинформ, 2015. - 18 с.
10. ГОСТ Р ИСО 9000-2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. М.: Стандартинформ, 2015. - 48 с.
11. ГОСТ Р 58876-2020 Системы менеджмента качества организаций авиационной, космической и оборонной отраслей промышленности. Требования/М.: ФГУП «Стандартинформ», -38с.
12. ГОСТ РВ 0015-002-2020. Система разработки и постановки на производство военной техники. Системы менеджмента качества. Требования
13. Вицелярова К.Н. Методика оценки эффективности и результативности проектов // Естественно-гуманитарные исследования. Международный журнал № 37 (5), 2021. С.48-52.
14. Ерлыгина Е.Г., Васильева А.Д. Внедрение проектного подхода в управление маркетинговой деятельностью организации // Экономические исследования. Научно-практический журнал. 2021, №4. С.73-76.
15. Штебнер, С. В. Применение проектного подхода в деятельности организации / С. В. Штебнер, К. А. Чубрина // Экономика и предпринимательство. – 2020. – № 9 (122). – С. 1126–1130. – DOI 10.34925/ЕІР.2020.122.9.220.
16. Сулейманов А.Р., Рогулин Ю.П. Особенности проектного менеджмента в современных условиях// Вестник Евразийской науки.2023.Том 15, №1. С.23-34.
17. Смирнов А.А. Реализация функций управления проектного менеджмента // Экономика и бизнес: теория и практика. - 2021 - № 5–3. - С. 89–92.
18. Дудин М.Н., Шкодинский С.В., Продченко И.А. Инновационная стратегия развития высокотехнологичных компаний: возможности проектного менеджмента // Экономика, предпринимательство и право. - 2021 - Т. 11 - № 5 - С. 1131–1150.
19. Сидорин А.В., Сидорин В.В., Покровская М.В. Кластерная модель организации проектирования и разработки
20. Сидорин А.В., Сидорин В.В., Покровская М.В. Обеспечение качества РЭС военного и двойного назначения на этапе проектирования и разработки // Электросвязь. 2015. № 6. С. 27-30.
21. Сидорин А.В., Сидорин В.В., Покровская М.В. Моделирование инновационной деятельности на этапе проектирования и разработки радиоэлектронных средств // Вестник МГТУ МИРЭА. 2015. № 3-2 (8). С. 145-153.
22. Сидорин В.В., Халилюлина Н.Б. Прогнозирование и управление выполнением научно-исследовательских и опытно- конструкторских работ Марковскими методами // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. 2023. № 3. С. 58-62.
23. Сидорин В.В., Халилюлина Н.Б. Прогнозирование результативности проектной деятельности на основе метода таблицы истинности (Truth Table Method, ТТМ) // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2024. № 3. С. 160-173.
24. Сидорин В.В., Халилюлина Н.Б. Математическая модель и метод прогнозирования ресурсоёмкости и оценки производственно-управленческого потенциала в системе менеджмента качества организации// Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2023. № 6. С. 137-152.
25. Ковригин Е.А. Интеграция современных цифровых технологий в систему менеджмента качества высокотехнологичных предприятий: Дис. к.т.н.: 05.02.23, [Место защиты: ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого»]. – СПб.: 2020. – 144 с.
26. Сидорин В.В. Система менеджмента качества с технологиями искусственного интеллекта // Организатор производства. 2024. № 1. С. 54-70.

27. Сидорин В.В. Система менеджмента качества организации в цифровой экономике // Методы менеджмента качества. 2018. № 2. С. 28-35.

28. Сидорин В.В., Халилюлина Н.Б. Система управления проектированием и разработкой наукоемкой высокотехнологичной продукции на основе цифровых информационных технологий // Автоматизация в промышленности. 2023, №03. С.28-35.

**Сидорин Виктор Викторович**

Автономная некоммерческая организация  
«Институт испытаний и сертификации вооружения  
и военной техники» (АНО «ИНИС ВВТ»), г.  
Москва

Руководитель Учебного центра доктор  
технических наук, профессор,  
профессор кафедры электроники Института  
перспективных технологий и индустриального  
программирования РТУ Московского МИРЭА,  
111524, Москва, Электродная улица, д.10  
e-mail: wwsid@yandex.ru; sidorin@inis.ru

**Халилюлина Надежда Борисовна**

Федеральное государственное бюджетное научное  
учреждение «Федеральный исследовательский центр  
Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова  
Российской академии наук» ИПФ РАН, г. Нижний Новгород  
Заведующая сектором системы менеджмента качества,  
аспирант кафедры электроники Института перспективных  
технологий и индустриального программирования РТУ  
МИРЭА, г. Москва  
603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120,  
ул. Ульянова, 46  
e-mail: nbh@ipfran.ru

V.V. SIDORIN, N.B. KHALILULINA

## THE MODEL AND METHOD OF EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF THE PROJECT

**Abstract.** *The article presents a model and a method for calculating the generalized project performance indicator based on its three key parameters - the result obtained, timeliness and cost of resources for the execution of work on the project. The main advantage of the method is its invariance, independence from the type of project activity – research or development work, from the purpose and type of work on the project. The universality of the method, the unity of approaches to evaluating various project implementation options creates conditions for decision-making when choosing them by all participants in the project. Evaluating the effectiveness of the project using the proposed method makes it possible to exchange evaluation data between organizations, customers and performers throughout the supply chain when creating complex knowledge-intensive high-tech products. The method provides an opportunity to compare different projects according to their effectiveness and choose the optimal approach to solving the task. Of particular importance is the evaluation of the effectiveness of the proposed method in the management of complex research and development work carried out by various organizations united by a common goal.*

**Keywords:** *project, effectiveness, research and development work, three-dimensional vector model, generalized performance indicator, unique result, deadlines, resources.*

## BIBLIOGRAPHY

1. GOST R ISO 10006-2019 Quality management. Guidelines for quality management in projects. Moscow: FSUE "Standartinform". 2019 32 p.
2. GOST R 54869-2011 Project management. Requirements for project management. Moscow: FSUE "Standartinform". 2012 8 p.
3. GOST R ISO 21500-2014 Project Management Manual. Moscow: FSUE "Standartinform". 2015 46 p.
4. GOST R 15.101-2021 Product development and commissioning system. The procedure for carrying out research work. Moscow: Federal State Budgetary Institution "PCT". 2021 14 p.
5. GOST R 15.000-2016 Product development and commissioning system. The main provisions. M.: FSUE "Standartinform". 2016 16 p.
6. GOST RV 15.105-2021 Military equipment. The procedure for carrying out scientific research and its components. Main provisions. Moscow: Federal State Budgetary Institution "PCT" 2021, 30 p.
7. GOST PB 15.103-2004 Product development and commissioning system. Military technics. The order of execution of the advance project and its components. Basic provisions. M.: Standartinform. 2005 41 p.
8. GOST PB 15.203-2001 Product development and commissioning system. Military technics. The procedure for performing development work on the creation of products and their components. Basic provisions. Moscow: 2001. 130 p.
9. GOST R ISO 9001-2015. Quality management systems. Requirements. Moscow: Standartinform, 2015. -18 p.
10. GOST R ISO 9000-2015. Quality management systems. Basic provisions and dictionary. M.: Standartinform, 2015. - 48 p.
11. GOST R 58876-2020 Quality management systems of organizations of the aviation, space and defense industries. Requirements / M.:FSUE "Standartinform", -38c.
12. GOST RV 0015-002-2020. The system of development and commissioning of military equipment. Quality management systems. Requirements.

13. Vitselyarova K.N. Methodology for evaluating the effectiveness and efficiency of projects // Natural sciences and Humanities research. International Journal No. 37 (5), 2021. pp.48-52.
14. Yerlygina E.G., Vasilyeva A.D. Implementation of the project approach in the management of marketing activities of the organization // Economic research. Scientific and practical journal. 2021, No.4. pp.73-76.
15. Shtebner, S. V. Application of the project approach in the organizations activities / S. V. Shtebner, K. A. Chubrina // Economics and entrepreneurship. – 2020. – № 9 (122). – Pp. 1126-1130. – DOI 10.34925/EIP.2020.122.9.220.
16. Suleymanov A.R., Rogulin Yu.P. Features of project management in modern conditions// Bulletin of Eurasian Science.2023.Volume 15, No. 1. pp.23-34.
17. Smirnov A.A. Implementation of project management functions // Economics and Business: theory and practice. - 2021 - No. 5-3. - pp. 89-92.
18. Dudin M.N., Shkodinsky S.V., Prodchenko I.A. Innovative strategy for the development of high-tech companies: the possibilities of project management // Economics, entrepreneurship and law. - 2021 - Vol. 11 - No. 5 - pp. 1131-1150.
19. Sidorin A.V., Sidorin V.V., Pokrovskaya M.V. Cluster model of organization of design and development of military and dual-use radioelectronic devices // Organizer of production. 2015. No. 2 (65). pp. 83-94.
20. Sidorin A.V., Sidorin V.V., Pokrovskaya M.V. Quality assurance of military and dual-use RES at the design and development stage // Telecommunications. 2015. No. 6. pp. 27-30.
21. Sidorin A.V., Sidorin V.V., Pokrovskaya M.V. Modeling of innovative activity at the stage of design and development of radioelectronic means // Vestnik MGTU MIREA. 2015. No. 3-2 (8). pp. 145-153.
22. Sidorin V.V., Khalilulina N.B. Forecasting and management of research and development work by Markov methods // Bulletin of the St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 4: Industrial Technologies. 2023. No. 3. pp. 58-62.
23. Sidorin V.V., Khalilulina N.B. Forecasting the effectiveness of project activities based on the Truth Table Method (TTM) // Fundamental and applied problems of engineering and technology. 2024. No. 3. pp. 160-173.
24. Sidorin V.V., Khalilulina N.B. Mathematical model and method of forecasting resource intensity and assessment of production and management potential in the quality management system of an organization// Fundamental and applied problems of engineering and technology. 2023. No. 6. pp. 137-152.
25. Kovrigin E.A. Integration of modern digital technologies into the quality management system of high-tech enterprises: PhD thesis: 05.02.23, [Place of protection: St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great]. – St. Petersburg: 2020. – 144 p.
26. Sidorin V.V. Quality management system with artificial intelligence technologies // Organizer of production. 2024. No. 1. pp. 54-70.
27. Sidorin V.V. The quality management system of an organization in the digital economy // Methods of quality management. 2018. No. 2. pp. 28-35.
28. Sidorin V.V., Khalilulina N.B. Control system for the design and development of high-tech high-tech products based on digital information technologies // Automation in industry. 2023, No.03. pp.28-35.

**Sidorin Viktor Viktorovich**

Autonomous non-profit organization  
"Institute of Testing and Certification of Weapons  
and Military Equipment" (ANO "InIS VVT"),  
Moscow  
Head of the Training Center, Doctor of Technical  
Sciences, Professor,  
Professor of the Department of Electronics of the  
Institute of Advanced Technologies and Industrial  
Programming of the Moscow MIREA RTU,  
111524, Moscow, Electrode Street, 10  
e-mail: wwsid@yandex.ru; sidorin@inis.ru

**Khalilulina Nadezhda Borisovna**

Federal State Budgetary Scientific Institution Federal  
Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied  
Physics of the Russian Academy of Sciences (IPF RAS),  
Nizhny Novgorod  
Head of the Quality Management System Sector,  
Postgraduate student of the Electronics Department of the  
Institute of Advanced Technologies and Industrial  
Programming of RTU MIREA, Moscow  
603950,  
Nizhny Novgorod, BOX-120, Ulyanova str., 46  
e-mail: nbh@ipfran.ru

© В.В. Сидорин, Н.Б. Халилюлина, 2024

П.В. РЯБЧИКОВ

## ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ КОНТРОЛЯ ТРУБОПРОВОДОВ ПОСЛЕ РЕАЛИЗАЦИИ МЕРОПРИЯТИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ НАДЁЖНОСТЬЮ

**Аннотация.** *Статья описывает результаты внедрения одного из методов повышения технологической составляющей надёжности. Существуют технические и технологические методы управления технологической составляющей надёжностью изделий. В статье рассмотрены вопросы оптимизации схемы контроля качества изготовления с помощью статистических методов на примере контроля трубопроводов высокого давления. После изменения схемы контроля понизилась вероятность пропуска дефекта. Взамен рентгенконтроля был применён метод акустического контроля зондирующими сигналами и получены достоверные данные о технологической надёжности детали (трубопровода).*

**Ключевые слова:** *Технологическое обеспечение надёжности, статистические методы контроля, организационные методы, контроль трубопроводов высокого давления.*

### Введение

В состав комплексного показателя надёжности могут входить показатели надёжности, достигнутые на этапе производства. Как правило, такие показатели контролируются по результатам заводских, приёмо-сдаточных и контрольных испытаний. Управление такими показателями осуществляется совокупностью организационных и технических методов, обеспечивающих реализацию технологического процесса.

Технологическая надёжность изделия – это совокупность технологических методов применяемых при производстве, обеспечивающих достижение комплексных показателей надёжности изделия, заданных при проектировании.

При рассмотрении методов повышения технологической надёжности, как совокупности приёмов (путей) для решения конкретной задачи целесообразно рассматривать эти задачи при постановке изделий на производство [1].

Первая задача является принципиальной. Это возможность посредством выполнения технологического процесса реализовать задуманное конструктором. Т.е. это фактическая возможность реализации спроектированной конструкции в материале с заданными свойствами [2].

Вторая задача более практическая – отработка технологии с целью её тиражирования, улучшения баланса затрат (трудоемкости, энергоресурсов, расходов материала и т.д.).

И третья задача, которая частично охватывает и вторую задачу – это постоянное совершенствование технологического процесса с целью повышения технологической составляющей надёжности изделия. Решение этой задачи, в отличие от второй, наоборот обычно увеличивает трудоемкость и стоимость продукции. Применительно к технологиям, почти зеркально повторяется ситуация с повышением надёжности при конструировании. Например, резервирование, как один из методов, существенно повышает надёжность конструкции, но увеличивает стоимость и массу готового изделия. Методы технологического повышения надёжности изделия целесообразно применять уже на этапе внедрения технологического процесса, сразу устанавливая повышенные требования [2]. Для упрощения внедрения технологических методов повышения надёжности разработаны специальные методики. С целью подтверждения возможности управления производственной составляющей надёжности, в соответствии с ранее разработанной методикой, в организации был апробирован организационный метод. Были внесены изменения в применяемую схему контроля и изменен метод контроля.

Предварительно был выполнен анализ действующих технологий и схем контроля, что позволило сделать выводы об избыточности сплошного рентген-контроля магистралей высокого давления ракеты-носителя из материала 12X18H10. Анализ других методов контроля и анализ организационно-технических возможностей организации позволил внести

соответствующие изменения. Для подтверждения достоверности контроля выполнены сравнительные исследования методов. В настоящей статье раскрывается порядок выполнения работ и достигнутые результаты.

### **Основная часть**

Большинство видов современной техники имеют в своих конструкциях пневматические или гидравлические системы. Рабочее тело в этих системах передается по трубопроводам. В зависимости от сложности конструкции, количество труб в этих объектах производства может существенно меняться. Например, ракета–носитель «Протон–М» имеет в своей конструкции около 2500 труб. Как известно, надежность всей системы зависит от совокупности показателей надежности каждого элемента данной системы [3]. Специфика трубопроводных систем в авиационной и ракетной промышленности следующая: сложность геометрических параметров, огромный сортамент применяемых материалов (от углепластика до жаропрочных нержавеющей сталей), агрессивные рабочие жидкости, многодетальность, широкое применение сварных соединений. Учитывая это, вопрос о качестве трубопроводных систем является достаточно актуальным.

Применение дублирующего метода неразрушающего контроля, позволяющего дать численную оценку надежности системы, позволило бы повысить достоверность контроля.

Один из традиционных методов контроля труб в производстве (испытания на прочность давлением) не может дать заключение о надёжности изделия. Например, после цикла испытаний давлением, нет никаких гарантий в том, что при последующей эксплуатации концентраторы внутренних напряжений не проявят себя (может наступить разрушение, потеря герметичности и т.д.). Следовательно, дополнительно необходимо производить контроль целостности структуры материала заготовки (детали). Методы люминесцентного и магнитоимпульсного контроля дают заключение лишь о целостности структуры поверхности. Метод ультразвукового контроля проблематично применять в связи со сложностью геометрических форм поверхностей труб. Наиболее полную картину о целостности структуры материала, из существующих методов, могут дать только методы контроля различными видами излучений, например рентген–контроль.

Но и метод рентген–контроля имеет ряд существенных недостатков, существенно ограничивающих его применение. Например, особые требования к помещению и жесткие нормы по охране труда. Работа на рентгеновских установках относится к вредным условиям труда. Часто бывает, что разрешающей способности оптики установок не хватает для определения мелких дефектов. Имеются проблемы проведения контроля в случае сложной геометрической формы. Исходя из выше перечисленного, следует, что на серийном производстве необходимо применять более экономически эффективный и безопасный метод неразрушающего контроля. Метод контроля по вероятностным характеристикам зондирующих сигналов – современное направление неразрушающего контроля. Было сделано предположение, о возможности заменить традиционный метод новым [4]. Существует множество различных методов контроля. Это как разрушающие методы, так и неразрушающие. В полном объеме, заменить их каким либо одним не представляется возможным. У каждого метода могут как быть достоинства, и могут быть и недостатки. Дополнительное влияние оказывает и степень оснащённости подразделений контроля.

Разные методы неразрушающего контроля характеризуются разными значениями технико–экономических параметров: чувствительностью, достоверностью, условиям применения, видами контролируемых объектов и т.д. Объективный анализ применения различных методов привел к выводу о целесообразности применения комплексных систем контроля, которые используют разные по физической природе методы исследования. Данное решение позволит исключить недостатки одних методов, взаимно дополнить методы. Но это может привести к увеличению трудоёмкости. Необходимо найти и реализовать принцип «разумного баланса» для повышения достоверности контроля и надёжности изделия [5,6].

Методика контроля по вероятностным характеристикам зондирующих сигналов разрабатывалась, как дублирующий метод контроля, позволяющий без локализации места дефекта дать заключение о годности трубопровода [7].

Схема реализации метода контроля технического состояния трубопроводов по вероятностным показателям тестовых сигналов представлена на рисунке 1.

Для проведения исследований выполнялась имитация дефектов или подбирались заготовки с заранее выявленными дефектами. Для подтверждения методики был выбран трубопровод из нержавеющей стали марки 12Х18Н10 диаметром 40,0 мм, толщина стенки 2,0 мм. Длина заготовки трубопровода составила 1200,0 мм. Для проведения эксперимента была отобрана труба в состоянии поставки, длиной 6000,0 мм. Данная труба была отбракована при входном визуальном контроле. На поверхности трубы были замечены дефекты типа волосовины, уходящие внутрь поверхности. Дефект был ярко выраженным и был подтвержден и в результате рентген-контроля. Из трубы 6000,0 мм удалось выбрать заготовку без дефектов. Одна заготовка была с описанным выше металлургическим дефектом (волосовины), и в одну заготовку были привнесены дефекты в виде глухого отверстия, просверленного дрелью, диаметр 0,5 мм, глубина около 1,0 мм. После отрезки заготовок, труба была согнута на ручном трубогибе (с нагревом) по шаблону. Затем к заготовкам были приварены резьбовые штуцеры. При приварке один сварной шов был выполнен специально с непроваром. Непровар был получен с помощью уменьшения силы тока. Готовые трубы были промыты уайт-спиритом и переданы на контроль для экспериментальной установки.

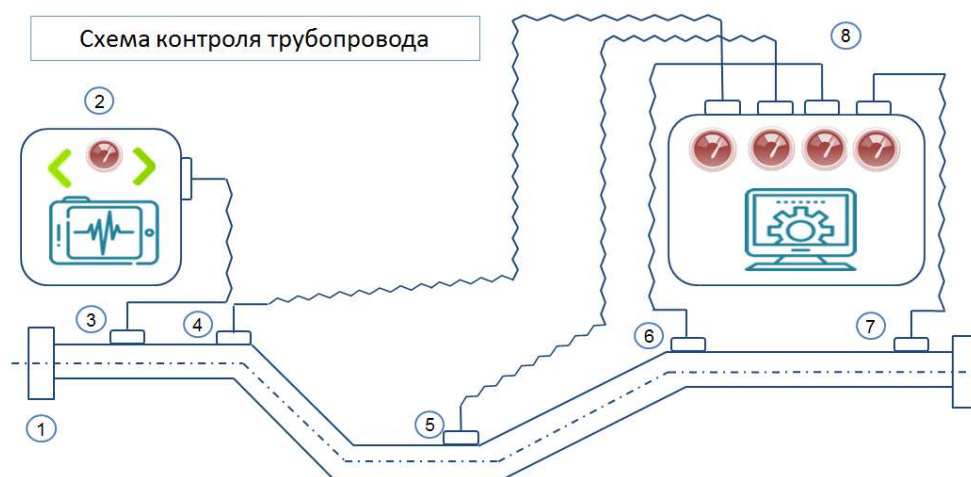


Рисунок 1 - Схема реализации метода контроля:

1 – объект контроля; 2 – генератор тестовых сигналов; 3 – излучатель; 4,5,6 и 7 – приёмники; 8 – анализатор выходных сигналов

Датчики закреплялись в одинаковых местах на трубопроводах. Около двух недель проводились работы по исследованиям трубы, признанной эталонной. Длительное время подбирались тестовые сигналы. После контроля была произведена оценка результатов. Оценка вероятности годности трубопровода проводилась по формуле 1.

$$P_r = \int_{\Delta Y_{min}}^{\Delta Y_{max}} (f_n \cap f_k) d\tau, \tau \in [0,10] \quad (1)$$

где  $Y_{max}$  – максимальная амплитуда тестового сигнала

$Y_{min}$  – минимальная амплитуда тестового сигнала

$f_n$  – плотность распределения случайных отклонений тестового сигнала в месте контроля при заведомо исправном состоянии трубопровода

$f_k$  – плотность распределения случайных отклонений тестового сигнала в месте контроля для контролируемого трубопровода

Формирование тестового сигнала в графическом виде представлено на рисунке 2.

Автоматизированная оценка соответствия распределению тестового (эталонного) сигнала с полученным фактическим сигналом и является вероятностью годности трубопровода магистрали. Интерпретация результатов в графическом виде представлена на

рисунке 3. Простота метода в том, что тестовый сигнал может быть практически любым. Характеристики сигнала подбираются под доступное оборудование [8].

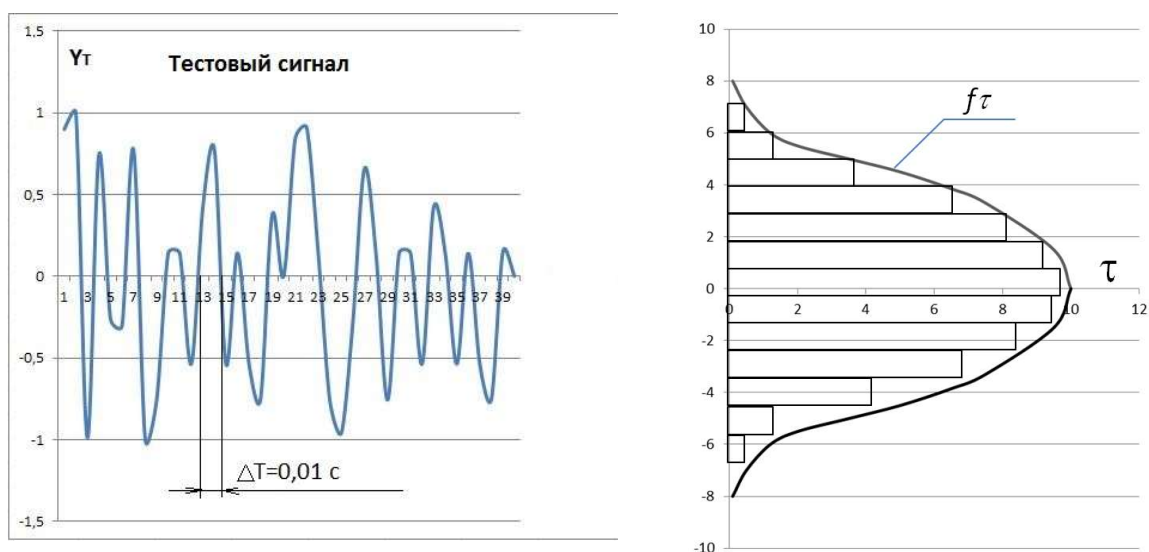


Рисунок 2 - Формирование тестового сигнала

Проведенные на десяти различных образцах исследования показали, что вероятность обнаружения дефекта, который считается недопустимым по действующим документам на изготовление трубопроводов высокого давления составляет 98,38472%.

Для топливных магистралей характерны следующие дефекты:

Дефекты проката заготовки труб: трещины, волосовины, расслоения, флокены, разрывы (внутренние), закаты и заковы, плен, рванины.

Дефекты сварки: трещины в околошовной зоне, прожоги, микротрещины, поры и раковины, шлаковые включения в шве, надрывы, непровары, пережоги.

Дефекты, возникающие при формообразовании эксплуатации изделий: холодные трещины, рихтовочные трещины, усталостные трещины, коррозионные нарушения поверхности, трещины, образующиеся в результате приложенных высоких механических напряжений, складки, разностенность и механические повреждения поверхности [9].

Метод позволит с высокой долей вероятности выявить отклонения от показателей сигналов, поданных на эталонный трубопровод. При этом, возможно отметить факторы, которые вносили погрешность.

Во первых, погрешность вносило качество фиксации (приклейки) датчиков. Стоит отметить, что в случае непрочной фиксации, отклонение полей распределения тестового и выходного сигнала было очень существенным. И это было сразу заметно, так как отклонение было как раз по плохо приклеенному датчику. При доработке математического аппарата, возможно автоматизировать выявление данного отклонения.

Во вторых, качество гибки и (углы, длины участков трубопровода) вносили некую погрешность, которая изначально воспринималась как выявление дефекта. Но, в целом эти погрешности позволяют в некоторой степени оценить соответствие геометрии контролируемого образца.

$Y_t$  – тестовый сигнал, формируемый с использованием датчиков случайных чисел с интервалом 0,01 с в течение не менее 10 с.

$Y_{\text{вых}}$  – выходные сигналы, принимающиеся датчиками с интервалом 0,01 с. Датчики устанавливаются в критических для каждого трубопровода местах (местах изгибов и утонения).

$f_{nl}$  – плотность распределения случайных отклонений тестового сигнала вместе контроля при заведомо исправном состоянии трубопровода.



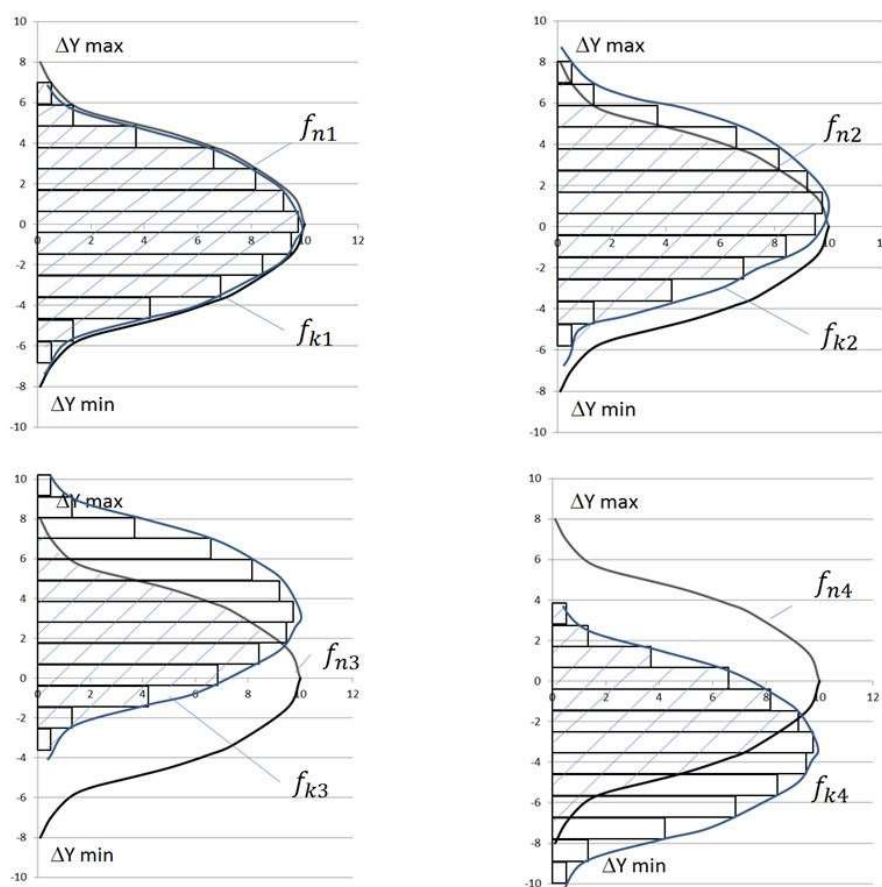


Рисунок 3 - Интерпретация выходного сигнала

$f_{k1}$  – плотность распределения случайных отклонений тестового сигнала в месте контроля для контролируемого трубопровода.

При этом точность позиционирования датчиков не вносила существенных погрешностей в измерения. Но для серийного применения метода конечно целесообразно использование трафарета или шаблона для позиционирования датчиков, что должно привести ещё к повышению достоверности результатов.

Конечно, метод не позволяет определить характер и местоположение дефекта. Он лишь позволяет оценить насколько контролируемый трубопровод соответствует эталонному. Т.е. для внедрения метода требуется проведение кропотливой работы по оценке годности эталона (определения эталона).

Существенным оказалось снижение трудоёмкости, необходимого для выявления дефекта. Вместо примерно 40 (сорока) минут для проведения рентген-контроля и исследования снимков, работа по установке датчиков и собственно проверки занимает не более 10 (десяти) минут, в том случае, когда эталон полностью отработан и сведения по нему корректны.

Была проведена статистика выявления дефектов аналогичных трубопроводов при применении метода рентген-контроля. На 100 (сто) магистралей примерно 1,2 случая выявления дефекта. Конечно, следует отметить высокий профессионализм рентгенологов и специалистов отдела технического контроля. Статистика выявления дефектов по новому методу ещё не была набрана, но предварительные результаты внушают оптимизм и позволяют сделать выводы, что достоверность контроля и выявляемость дефектов будет не хуже. Отдельно возможно сделать выводы о снижении риска влияния пресловутого «человеческого фактора», ведь дефект на рентгеновской плёнке возможно и не заметить. К тому же, специалисты в области сварки отмечают, что в связи с известными событиями, зарубежные плёнки сильно выросли в стоимости, а качество тех плёнок, что имеются на рынке, стало существенно хуже.



### **Заключение**

Управление технологической составляющей надежности, возможно осуществлять при производстве продукции. Наиболее эффективны такие мероприятия при постановке изделий на производство или при подготовке опытного производства [10].

Организационные методы управления технологической составляющей надёжностью включают в себя:

- контроль за соответствием технологического процесса и исследования по фактам нарушения технологического процесса (управление технологической дисциплиной);
- установление рациональной схемы контроля.

Применен метод установления рациональной схемы контроля. Внедрение метода осуществлялось по разработанной методике. Порядок работ по методике включал в себя: анализ наиболее доступных методов к применению, и сравнительные испытания методов. Традиционный метод сплошного рентген-контроля был заменён на сплошной метод контроля зондирующими сигналами. Примененный новый метод не может выявить место дефекта, но вероятность обнаружения дефекта (без определения его топологии) фактически даже превышает традиционный. Традиционный метод был переведён в дублирующий, для поиска конкретного места дефекта в случае его обнаружения.

Результаты исследования показали, что внедрение организационных методов управления технологической составляющей надёжности может оказывать существенное влияние на надёжность изделия в целом, так как снижается вероятность пропуска дефекта.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Рябчиков, П. В., Технологическая или производственная надежность? Обоснование терминологии / П. В. Рябчиков, М. М. Лобастов, А. В. Лобанов [и др.] // Вестник НПО Техномаш. – 2022. – № 3(20). – С. 36-39.
2. Рябчиков, П. В. Актуальные вопросы развития теории надежности. Технологическая надежность изделий / П. В. Рябчиков, М. А. Назаренко // Технология машиностроения. – 2022. – № 7. – С. 5-11.
3. Рябчиков, П. В. Организационно-технологическая надежность производственных процессов. Фотоконтроль / П. В. Рябчиков, М. А. Назаренко // Компетентность. – 2023. – № 8. – С. 51-55. – DOI 10.24412/1993-8780-2023-8-51-55.
4. Литвиненко, В. П. Исследование надежности судовых двигателей по условию форсирования / В. П. Литвиненко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2023. – № 6(362). – С. 179-183. – DOI 10.33979/2073-7408-2023-362-6-179-183.
5. Пьянков, И.Н. Акустические методы контроля лопаток газотурбинных двигателей / И. Н. Пьянков, В. Н. Трофимов, В. А. Пьянков, А. А. Карабутов // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. – 2020. – Т. 2. – С. 90-93..
6. Борминский, С. А. Акустический метод контроля уровня, плотности и вязкости многослойных жидкостей в резервуарах / С. А. Борминский // Автоматизация в промышленности. – 2019. – № 10. – С. 10-14.
7. Хомутова, Е. Г. Описание процессов в системе менеджмента качества: учебно-методическое пособие / Хомутова Е. Г., Спиридонова А. А. - Москва: РТУ МИРЭА, 2021. - 75 с. - ISBN 978-5-7339-1400-8: Б. ц.
8. Александрова, С. В. Возможности цифровизации систем менеджмента качества / С. В. Александрова, В. А. Васильев, М. Н. Александров // Качество. Инновации. Образование. – 2021. – № 1(171). – С. 17-21. – DOI 10.31145/1999-513x-2021-1-17-21.
9. Тельнов, Ю. Ф. Технология проектирования инновационных процессов создания продукции и услуг сетевого предприятия с использованием i4.0-системы, основанной на знаниях / Ю. Ф. Тельнов, В. А. Казаков, А. В. Данилов // Бизнес-информатика. – 2021. – Т. 15, № 4. – С. 76-92. – DOI 10.17323/2587-814X.2021.4.76.92.
10. Ковалев, В.Д. Формирование износостойких слоев на сталях и чугунах наплавкой и нанесением износостойких покрытий / В. Д. Ковалев, В. П. Панков, С. Ю. Радченко, М. В. Куликов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2023. – № 5(361). – С. 30-39. – DOI 10.33979/2073-7408-2023-361-5-30-39.
11. Рябчиков, П. В. Совершенствование научных инструментов оценки, мониторинга и прогнозирования качества продукции на основе создания систем технологического обеспечения надежности продукции / П. В. Рябчиков, М. А. Назаренко // Оборонный комплекс - научно-техническому прогрессу России. – 2023. – № 2(158). – С. 51-55. – DOI 10.52190/1729-6552\_2023\_2\_51.

#### **Рябчиков Павел Вячеславович**

АО «Научно-производственное объединение «Техномаш» имени С.А. Афанасьева».

Руководитель проектного офиса

127018, г. Москва, проезд Марьиной рощи 3-й, д. 40 стр. 1

Аспирант РТУ МИРЭА

E-mail: p.ryabchikov@tmnp.ru

P.V. RIABCHIKOV

## IMPROVING THE RELIABILITY OF CONTROL RESULTS AFTER THE IMPLEMENTATION OF RELIABILITY MANAGEMENT MEASURES

**Abstract.** *The article describes the results of the implementation of one of the methods to improve the technological component of reliability. There are technical and technological methods for managing the technological component of product reliability. The article discusses the optimization of the manufacturing quality control scheme using statistical methods on the example of high-pressure pipeline control. After changing the control scheme, the probability of missing a defect decreased. Instead of X-ray control, the method of acoustic control with probing signals was applied and reliable data on the technological reliability of the part (pipeline) were obtained.*

**Keywords:** *Technological assurance of reliability, statistical control methods, organizational methods, control of high-pressure pipelines.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Riabchikov, P. V., Technological or production reliability? Justification of terminology / P. V. Riabchikov, M. M. Lobastov, A.V. Lobanov [et al.] // Bulletin of NPO Technomash. – 2022. – № 3(20). – Pp. 36-39.
2. Ryabchikov, P. V. Topical issues of the development of reliability theory. Technological reliability of products / P. V. Ryabchikov, M. A. Nazarenko // Technology of mechanical engineering. - 2022. – No. 7. – pp. 5-11.
3. Ryabchikov, P. V. Organizational and technological reliability of production processes. Photo control / P. V. Ryabchikov, M. A. Nazarenko // Competence. - 2023. – No. 8. – pp. 51-55. – DOI 10.24412/1993-8780-2023-8-51-55.
4. Litvinenko, V. P. Investigation of the reliability of marine engines under the forcing condition / V. P. Litvinenko // Fundamental and applied problems of engineering and technology. – 2023. – № 6(362). – Pp. 179-183. – DOI 10.33979/2073-7408-2023-362-6-179-183.
5. Pyankov, I.N. Acoustic methods of control of blades of gas turbine engines / I. N. Pyankov, V. N. Trofimov, V. A. Pyankov, A. A. Karabutov // Aerospace engineering, high technologies and innovations. - 2020. – Vol. 2. – pp. 90-93.
6. Borminsky, S. A. Acoustic method for monitoring the level, density and viscosity of multilayer liquids in tanks / S. A. Borminsky // Automation in industry. – 2019. – No. 10. – pp. 10-14.
7. Khomutova, E. G. Description of processes in the quality management system: an educational and methodological manual / Khomutova E. G., Spiridonova A. A. - Moscow: RTU MIREA, 2021. - 75 p. - ISBN 978-5-7339-1400-8: B. ts.
8. Alexandrova, S. V. Possibilities of digitalization of quality management systems / S. V. Alexandrova, V. A. Vasiliev, M. N. Alexandrov // Quality. Innovation. Education. – 2021. – № 1(171). – Pp. 17-21. – DOI 10.31145/1999-513x-2021-1-17-21.
9. Telnov, Yu. F. Technology of designing innovative processes for creating products and services of a network enterprise using i4.0-a knowledge-based system / Yu. F. Telnov, V. A. Kazakov, A.V. Danilov // Business Informatics. – 2021. – Vol. 15, No. 4. – pp. 76-92. – DOI 10.17323/2587-814X.2021.4.76.92.
10. Kovalev, V.D. Formation of wear-resistant layers on steels and cast irons by surfacing and applying wear-resistant coatings / V. D. Kovalev, V. P. Pankov, S. Yu. Radchenko, M. V. Kulikov // Fundamental and applied problems of engineering and technology. – 2023. – № 5(361). – Pp. 30-39. – DOI 10.33979/2073-7408-2023-361-5-30-39.
11. Ryabchikov, P. V. Improvement of scientific tools for evaluating, monitoring and forecasting product quality based on the creation of systems for technological assurance of product reliability / P. V. Ryabchikov, M. A. Nazarenko // The defense complex is dedicated to the scientific and technical progress of Russia. – 2023. – № 2(158). – Pp. 51-55. – DOI 10.52190/1729-6552\_2023\_2\_51.

**Riabchikov Pavel Viacheslavovich**

JSC "Scientific and Production Association "Technomash" named after S.A. Afanasyev"

127018, Moscow, 3rd Maryina Grove passage, 40 p.1

PhD student RTU MIREA

E-mail: p.ryabchikov@tmnpo.ru

© П.В. Рябчиков, 2024

В.Г. ТОПОЛЬНИК

## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПИЩЕВАРОЧНЫХ КОТЛОВ АВАТ ПРОИЗВОДСТВА АО «ЧУВАШТОРГТЕХНИКА»

**Аннотация.** В работе представлена модель состава системы, включающей 58 моделей пищеварочных котлов Abat для общественного питания производства АО «Чувашторгтехника». На основании технических характеристик и стоимости котлов определены их показатели качества, обобщенная оценка технического уровня и показатели конкурентоспособности внутри системы. Установлено, что более высокие оценки технического уровня и конкурентоспособности имеют стационарные котлы и опрокидываемые ручным и электрическим способом без миксера – устройства для перемешивания обрабатываемой продукции.

Полученные результаты помогут покупателю принять оптимальное решение о выборе конкретной модели котла.

**Ключевые слова:** система, общественное питание, технические параметры показатели качества, технический уровень, показатель конкурентоспособности.

### Введение

В условиях, когда на рынке представлен широкий ассортимент продукции, особую актуальность приобретает информация о ее качестве. Вопросы качества важны не только потребителю, но и производителю продукции. Качество технических изделий отражается в их технических параметрах, характеризуя их технический уровень. Эта информация помогает потребителю выбрать наиболее совершенные изделия, производителю – улучшать свою продукцию.

Более 65 лет на российском рынке торгово-технологического оборудования для общественного питания работает производственный кластер под брендом Abat, включающий головное предприятие АО «Чувашторгтехника» и его филиалы: ООО «Элинокс», ООО «Фросто», АО «Торговая механика» и ООО «ЗММ». Этот производственный кластер по праву занимает лидирующее место в данном сегменте рынка России и СНГ, благодаря высокому качеству и надежности выпускаемого оборудования и его сервисного обслуживания. Предприятие имеет сертифицированную по ISO 9001 систему менеджмента качества [1].

Среди широкой номенклатуры производимого оборудования существенную часть составляет тепловое оборудование, в том числе электрические пищеварочные котлы, пользующиеся большим спросом. Трудно найти предприятие общественного питания, где нет пищеварочных котлов.

Под брендом «Abat» создана целая гамма электрических пищеварочных котлов для общественного питания вместимостью от 60 до 500 л (дм<sup>3</sup>). Это стационарные котлы для приготовления бульона, третьих блюд, кипячения воды со сливным краном; опрокидываемые, с ручным и автоматическим опрокидыванием, с миксером для перемешивания содержимого и без него, со сливным краном и без него для приготовления первых, вторых и третьих блюд (супов, соусов, каш, кремов, десертов) и кипячения воды [2].

Для обеспечения технологического процесса в предприятии общественного питания, вновь открывающегося или функционирующего, требующего технического переоснащения, приходится приобретать необходимое оборудование. В ситуации, когда на рынке имеется большое количество изделий одинакового назначения, отличающихся техническими характеристиками, покупателю – работникам предприятий общественного питания, затруднительно принимать решение о приобретении той или иной модели оборудования. Каждый ответственный руководитель заинтересован в приобретении наиболее технически совершенных моделей. Главной проблемой в данном случае является выбор современной модели котла, с лучшими техническими характеристиками. Немаловажное значение имеет и стоимость оборудования.

В доступной нам научно-технической литературе нет сведений о сравнительной оценке качества пищеварочных котлов производства Abat, за исключением [3]. Однако, в этой публикации данные были получены для отдельных моделей котлов разных производителей, где установлено качественное преимущество некоторых моделей котлов Abat перед котлами других производителей. Кроме того, происходит непрерывное совершенствование конструкции, изменяется цена изделий; при покупке оборудования предприятия

общественного питания должны ориентироваться на современные данные всей системы производимых АО «Чувашторгтехника» электрических пищеварочных котлов (рисунок 1).



*Рисунок 1 - Модель состава системы электрических пищеварочных котлов Abat*

Система объединяет 58 моделей. На рисунке отражены группы пищеварочных котлов, отличающиеся особенностями конструктивных решений, обеспечивающих свое назначение при их эксплуатации. В системе котлов выделено две подсистемы 1-го уровня – стационарные и опрокидываемые котлы. Подсистема опрокидываемых котлов включает две подсистемы 2-го уровня – с ручным и автоматическим (электрическим) опрокидыванием. В этих подсистемах выделяются подсистемы 3-го уровня – по методу управления процессом опрокидывания при выгрузке из котла содержимого (готового продукта). Котлы с миксером обеспечивают перемешивание продукции в процессе приготовления. Подсистемы 4-го уровня включают котлы одинакового функционального назначения, отличающиеся производительностью (вместимостью варочного сосуда), модели одного параметрического ряда.

#### **Основная часть**

Каждая модель имеет свои технические характеристики, которые могут быть использованы в виде показателей качества непосредственно или после соответствующего преобразования. Качество технических изделий, в том числе и технологического оборудования, оценивают, прежде всего, его техническим уровнем [4, с. 8], учитывая его основные технические параметры: габариты, масса, установленная мощность и главный параметр, по значению которого разрабатывается так называемый параметрический ряд – линейка оборудования одного типа. Для пищеварочных котлов главным параметром является объем варочного сосуда. Котлы Abat имеют такие значения главного параметра: 60, 100, 160, 200, 250, 350, 400, 500 дм<sup>3</sup> (литров). Значение главного параметра указывается в марке котла.

Цель работы – дать количественную характеристику технического уровня поставляемых на рынок под торговой маркой Abat электрических пищеварочных котлов как

системы, выявить наиболее технически совершенные, конкурентоспособные (цена/технический уровень) модели, что позволит потребителю выбрать наиболее оптимальную для конкретных условий модель.

Структурная модель количественной характеристики конкурентоспособности анализируемых котлов приведена на рисунке 2.

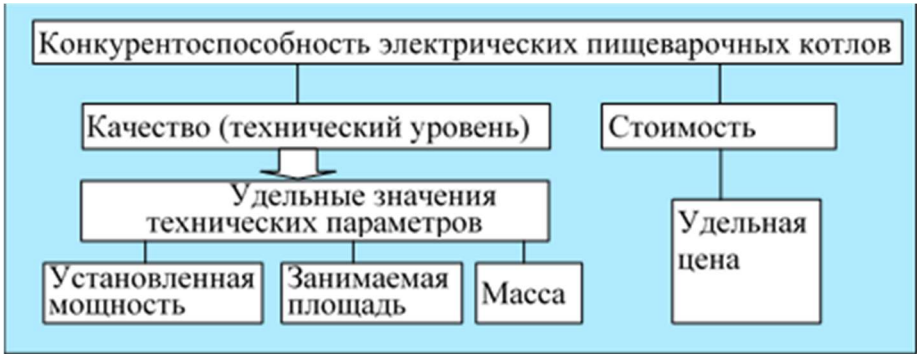


Рисунок 2 – Структурная модель оценки конкурентоспособности электрических пищеварочных котлов торговой марки Abat

Поскольку указанные выше основные технические параметры оборудования зависят от значения главного параметра, чтобы оценивать и анализировать технический уровень (качество) всей линейки оборудования конкретного типа, используют удельные значения основных параметров (удельная мощность, удельная занимаемая площадь, удельная масса) как приходящиеся на единицу главного параметра (для котлов – дм³). Аналогично определяли удельную цену (с НДС 20% на 01.07.2024 г. [5]) оборудования.

Удельные значения характеризуют качество оборудования с позиции его компактности и экономичности расхода материалов при изготовлении, что формирует отпускную цену оборудования. При эксплуатации удельные показатели будут влиять на себестоимость готовой кулинарной продукции, которая учитывает издержки по амортизационным отчислениям от стоимости оборудования, отчисления по размеру использованных производственных площадей и, наконец, по затратам электроэнергии.

Для соответствующих групп моделей котлов, указанных на рисунке 1, на основании технических характеристик и их стоимости, приведенных в [2], определены их удельные значения, которые представлены в таблице 1.

Оценку удельных показателей определяли по формуле:

$$K_i = \left( \frac{P_i}{P_i^{баз}} \right)^{-1} \tag{1}$$

где  $P_i$  – значение показателя качества оцениваемой модели котлов;  
 $P_i^{баз}$  – соответствующее значение показателя качества, принятого за базовый при сравнении. Базовое значение – среднее значение для группы.

Таблица 1 – Показатели качества основных технических параметров электрических пищеварочных котлов торговой марки Abat

№ п/п	Модель котла	Абсолютные значения показателей качества			
		Удельная мощность, Вт /дм³ (N <sub>y</sub> )	Удельная занимаемая площадь, м²/дм³ ×10⁴ (S <sub>y</sub> )	Удельная масса, кг/дм³ (M <sub>y</sub> )	Удельная цена, руб/дм³ (Ц <sub>y</sub> )
	Стационарные, без миксера, со сливным краном				
1	КПЭМ-60/9Т	151,7	108,4	1,58	3316
2	КПЭМ-60/7Т	151,7	116,0	1,58	3349
3	КПЭМ-100/9Т	181,0	85,4	1,21	2395

4	КПЭМ-160/9Т	113,1	53,4	0,79	1522
5	КПЭМ-200/9Т	90,5	28,3	0,71	1284
6	КПЭМ-250/9Т	72,4	22,6	0,60	1085
7	КПЭМ-250	72,8	50,4	0,57	1291
8	КПЭМ-400ТМ	113,0	38,5	0,58	1200
9	КПЭМ-500ТМ	108,4	40,2	0,64	1344
Среднее значение		117,2	60,4	0,73	1865
<b>Ручное опрокидывание, аналоговое управление, без миксера</b>					
1	КПЭМ-60-ОР	151,7	102,5	1,45	3131
2	КПЭМ-100-ОР	181,0	102,5	1,09	230 5
3	КПЭМ-160-ОР	113,1	64,9	0,81	1556
Среднее значение		148,6	90,0	1,12	2331
<b>Ручное опрокидывание, аналоговое управление, с миксером</b>					
1	КПЭМ-60-ОМР	170,0	117,9	2,22	5973
2	КПЭМ-60-ОМР	170,0	131,1	2,27	6241
3	КПЭМ-100-ОМР	192,0	109,0	1,51	3891
4	КПЭМ-100-ОМР	192,0	116,7	1,54	4031
5	КПЭМ-160-ОМР	120,0	68,1	1,02	2489
6	КПЭМ-160-ОМР	120,0	73,0	1,04	2628
Среднее значение		113,0	102,6	1,60	4209
<b>Ручное опрокидывание, мембранная клавиатура, с миксером</b>					
1	КПЭМ-60-ОМР-В	171,7	132,3	2,70	7479
2	КПЭМ-100-ОМР-В	197,0	120,3	2,09	5111
3	КПЭМ-160-ОМР-В	123,1	75,2	1,43	3402
Среднее значение		163,9	109,3	2,07	5331
<b>Ручное опрокидывание, мембранная клавиатура, с миксером и сливным краном,</b>					
1	КПЭМ-60-ОМР-ВК	171,7	141,7	2,80	7995
2	КПЭМ-100-ОМР-ВК	197,0	128,2	2,19	5444
3	КПЭМ-160-ОМР-ВК	123,1	80,1	1,47	3503
Среднее значение		163,9	116,7	2,18	5647
<b>Электрическое опрокидывание, мембранная клавиатура, без миксера</b>					
1	КПЭМ-60-О	153,3	154,9	3,17	6989
2	КПЭМ-100-О	182,0	133,5	2,14	4794
3	КПЭМ-160-О	113,8	83,5	1,43	3143
4	КПЭМ-250-О	108,8	64,1	1,16	2431
5	КПЭМ-350-О	103,4	45,8	0,94	1884
Среднее значение		132,3	96,4	1,77	3848
<b>Электрическое опрокидывание, мембранная клавиатура, без миксера, со сливным краном</b>					
1	КПЭМ-160-О	113,8	84,4	1,53	3342
2	КПЭМ-250-О	108,8	66,5	1,19	2487
3	КПЭМ-350-О	103,4	45,8	0,94	1966
Среднее значение		108,7	65,6	1,22	2598
<b>Электрическое опрокидывание, мембранная клавиатура, с миксером</b>					
1	КПЭМ-60-ОМ2	165,0	154,9	3,87	11231
2	КПЭМ-100-ОМ2	210,0	133,6	2,66	7250
3	КПЭМ-160-ОМ2	131,3	83,5	1,71	4696
4	КПЭМ-200-ОМ2	143,5	83,1	1,63	4186
Среднее значение		162,5	113,8	2,47	6841
<b>Электрическое опрокидывание, мембранная клавиатура, с миксером и сливным краном</b>					
1	КПЭМ-100-ОМ2	210,0	133,6	2,64	7370
2	КПЭМ-160-ОМ2	131,3	83,5	1,73	4770

3	КПЭМ-200-ОМ2	143,5	83,0	1,65	4252
4	КПЭМ-250-ОМ2	114,8	66,4	1,40	3714
5	КПЭМ-350-ОМ2	107,7	47,5	1,11	2777
6	КПЭМ-500-ОМ2	116,6	55,7	1,79	4248
Среднее значение		137,3	78,3	1,72	4514
<b>Электрическое опрокидывание, TFT-экран, с миксером</b>					
1	КПЭМ-60-ОМП	165,0	154,9	3,90	13823
2	КПЭМ-100-ОМП	210,0	133,6	2,61	8852
3	КПЭМ-160-ОМП	131,3	83,5	1,71	5806
4	КПЭМ-200-ОМП	143,5	83,1	1,61	5111
5	КПЭМ-250-ОМП	114,8	66,5	1,39	4189
6	КПЭМ-350-ОМП	107,7	47,5	1,11	3130
Среднее значение		145,5	94,9	2,06	5844
<b>Электрическое опрокидывание, TFT-экран, с миксером и сливным краном</b>					
1	КПЭМ-60-ОМП	165,0	154,9	3,95	14067
2	КПЭМ-100-ОМП	210,0	133,6	2,64	8990
3	КПЭМ-100-ОМП-В	210,0	133,6	2,61	9235
4	КПЭМ-160-ОМП	131,3	83,5	1,73	5890
5	КПЭМ-200-ОМП	143,5	83,1	1,65	5184
6	КПЭМ-250-ОМП	114,8	66,5	1,40	4246
7	КПЭМ-350-ОМП	107,7	47,5	1,11	3184
Среднее значение		154,6	100,4	2,15	7257

Обратная зависимость выбрана потому, что совершенство модели тем выше, чем меньше значения потребляемой энергии (установленная мощность), масса, габариты и цена оборудования.

Обобщенную оценку технического уровня каждой модели определяли с использованием средневзвешенной арифметической величины:

$$K_{TY} = \sum_{i=1}^3 m_i \times K_i, \quad (2)$$

где  $m_i$  – коэффициент весомости показателя;

$K_i$  – оценка показателя.

Приняты следующие значения коэффициентов весомости: удельная мощность – 0,65; удельная занимаемая площадь – 0,20; удельная масса – 0,15 [6, с. 117].

Результаты сравнения (оценки) удельных показателей групп моделей приведены на рисунках 2 – 7.

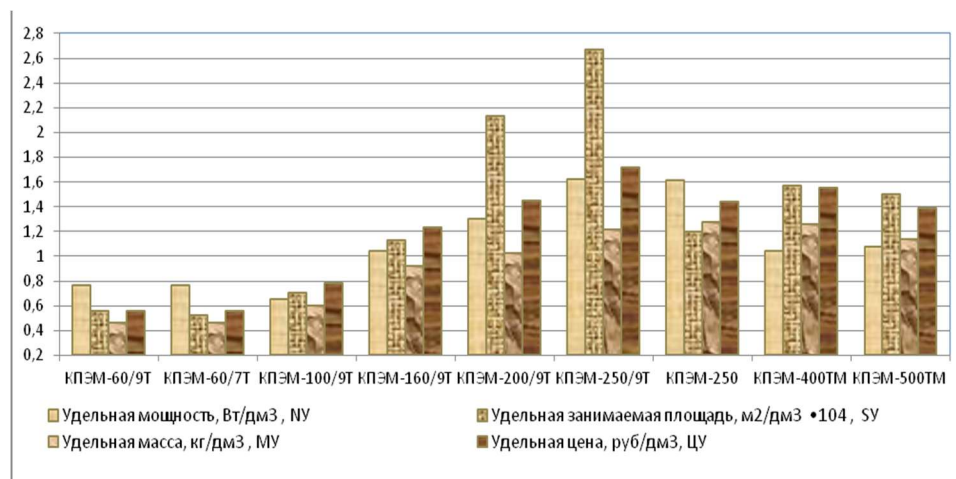


Рисунок 3 – Оценки единичных показателей технического совершенства стационарных котлов без миксера со сливным краном



Анализ полученных данных позволяет выявить модели с более высокими единичными оценками технического уровня и стоимости изделия.

Результаты показали, что в группе стационарных котлов (рисунок 3) техническое совершенство повышается с увеличением емкости варочного объема. Наиболее совершенные котлы емкостью 200 и 250 дм<sup>3</sup> серии 9Т, особенно за счет компактности (удельной занимаемой площади). Котлы емкостью 250, 400 и 500 дм<sup>3</sup> находятся примерно на одинаковом уровне, их удельные значения параметров превышают средние значения для этой группы (оценки > 1,0).

Для котлов с ручным опрокидыванием (рисунок 4) без миксера (ОР) и с миксером (ОМР) высокие единичные оценки имеют котлы емкостью 160 дм<sup>3</sup> как менее металлоемкие и дешевые.

Для котлов с ручным опрокидыванием (рисунок 5) с миксером (ОМР-В) и со сливным краном (ОМР-ВК) более совершенны котлы емкостью 160 дм<sup>3</sup>, оценки для котлов одного типоразмера примерно одинаковы

Оценки показателей для котлов с электрическим опрокидыванием (рисунок 6) без миксера и без сливного крана типоразмера  $\geq 160$  дм<sup>3</sup> имеют более высокие значения; техническое совершенство котлов со сливным краном повышается с ростом типоразмера.

Котлы на 350 дм<sup>3</sup> более компактны, менее металлоемки и дешевле.

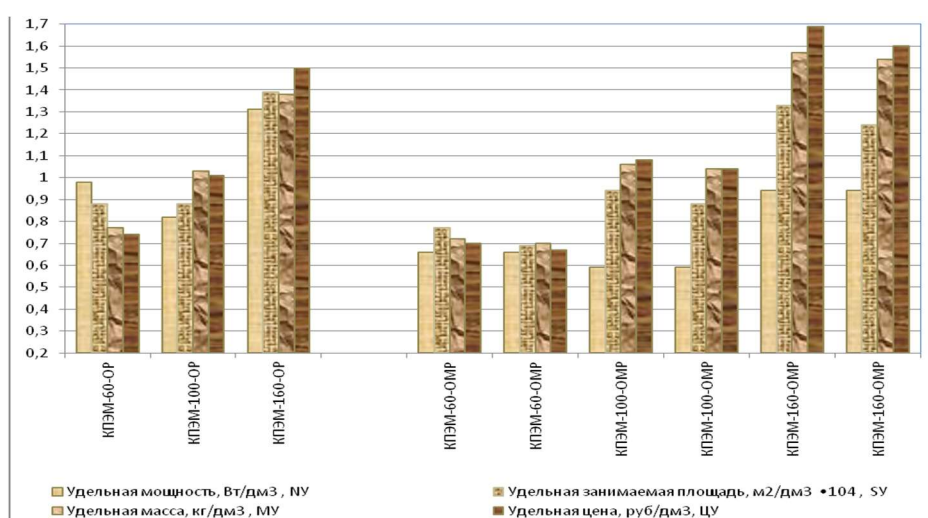


Рисунок 4 – Оценки единичных показателей технического совершенства котлов с ручным опрокидыванием без миксера (ОР) и с миксером (ОМР)

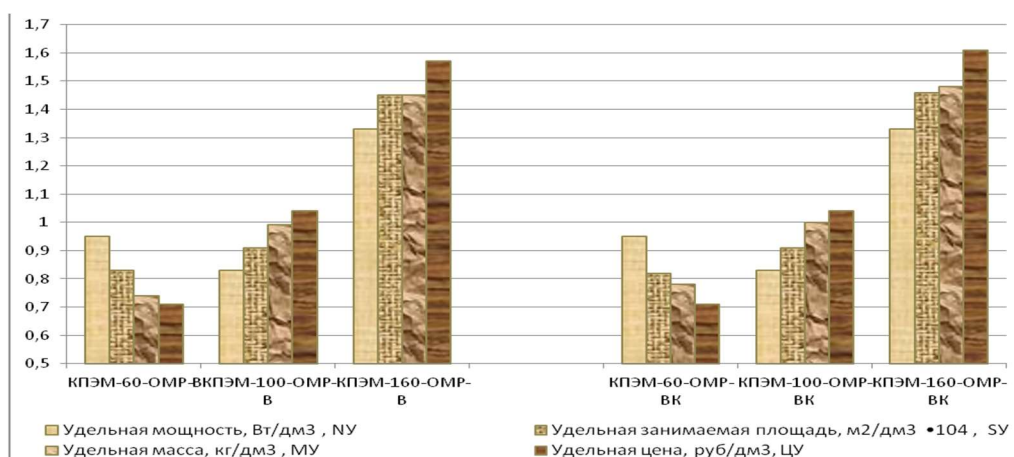


Рисунок 5 – Оценки единичных показателей технического совершенства котлов с ручным опрокидыванием, мембранная клавиатура, с миксером (ОМР-В) и со сливным краном (ОМР-ВК)

В группе котлов с электрическим опрокидыванием с миксером (рисунок 7) без сливного крана высокие оценки имеют котлы емкостью 160 и 200 дм<sup>3</sup> (компактны, менее металлоемки и относительно дешевы); для котлов со сливным краном высокие единичные оценки установлены для типоразмера 250 и 350.



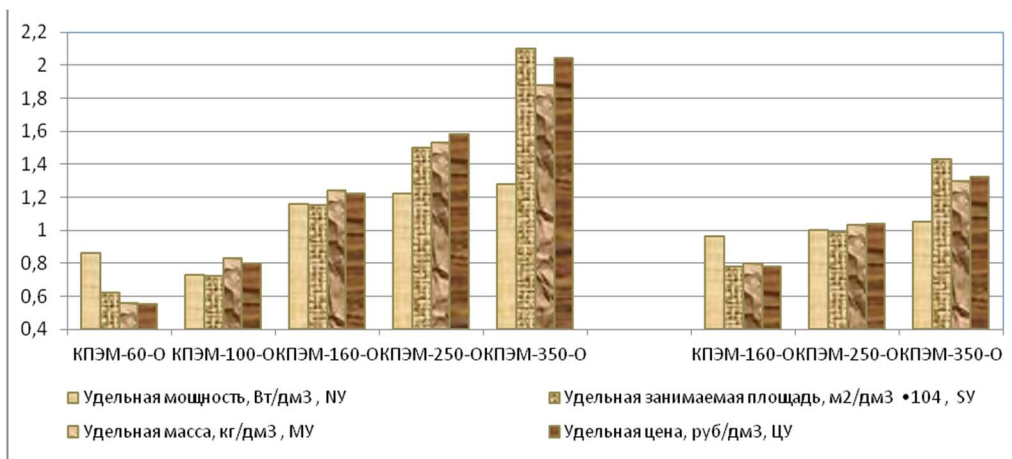


Рисунок 6– Оценки единичных показателей технического совершенства котлов с электрическим опрокидыванием, мембранная клавиатура, без миксера (60-350) и со сливным краном (160-350)

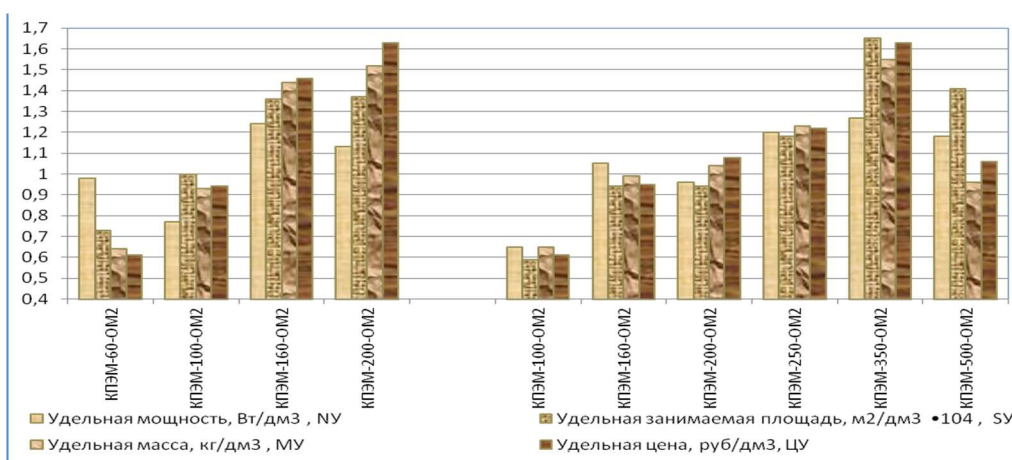


Рисунок 7– Оценки единичных показателей технического совершенства котлов с электрическим опрокидыванием, мембранная клавиатура, с миксером (60-200) и со сливным краном (100-500)

В группе котлов с электрическим опрокидыванием, управление – TFT-экран (рисунок 8) с миксером как без, так и со сливным краном, хорошо видно повышение оценок единичных показателей технического уровня и цены с увеличением емкости котла.

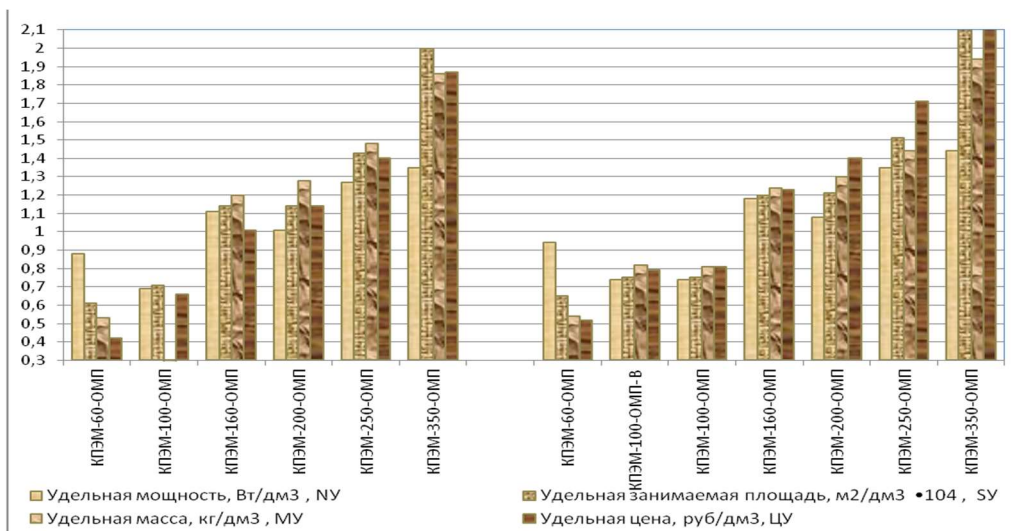


Рисунок 8– Оценки единичных показателей технического совершенства котлов с электрическим опрокидыванием, TFT-экран, с миксером без сливного крана и со сливным краном

При покупке оборудования предприятия питания руководствуются, прежде всего, его способностью обеспечивать производственный процесс, которая, как правило, связана с его главным параметром. Поэтому логично иметь сравнительные оценки технического уровня пищеварочных котлов для каждой позиции параметрического ряда.

На рисунках 9 - 13 приведены единичные и комплексные оценки пищеварочных котлов, выпускаемых АО «Чувашторгтехника» в настоящее время.

Из рисунка 9 видно, что для котлов емкостью 60 дм<sup>3</sup> самую высокую (1,23) комплексную оценку технического уровня ( $K_{ту}$ ), рассчитанную по (2), имеет пищеварочный котел марки КПЭМ-60-ОР без миксера, с ручным опрокидыванием. Высокая оценка  $K_{ту}$  для стационарных котлов и котлов с ручным опрокидыванием. Все опрокидываемые котлы с миксером, как со сливным краном, так и без него, имеют комплексную оценку  $\leq 1,0$ .

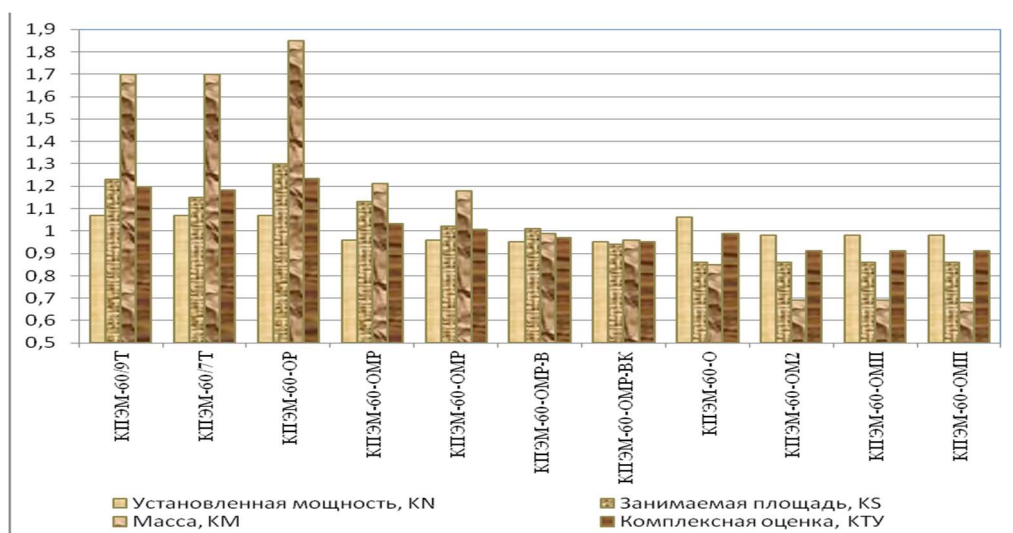


Рисунок 9 - Единичные и комплексные оценки технического уровня пищеварочных котлов Abat емкостью 60 дм<sup>3</sup>

Для котлов емкостью 100 дм<sup>3</sup> (рисунок 10) более технически совершенны стационарный котел и котел с ручным опрокидыванием без миксера в основном из-за меньшей металлоемкости. Комплексная оценка технического уровня котлов с миксером для перемешивания содержимого с ручным опрокидыванием примерно одинакова. Для них также отмечена высокая оценка металлоемкости. Технический уровень котлов с электрическим опрокидыванием не превышает средний уровень (1,0).

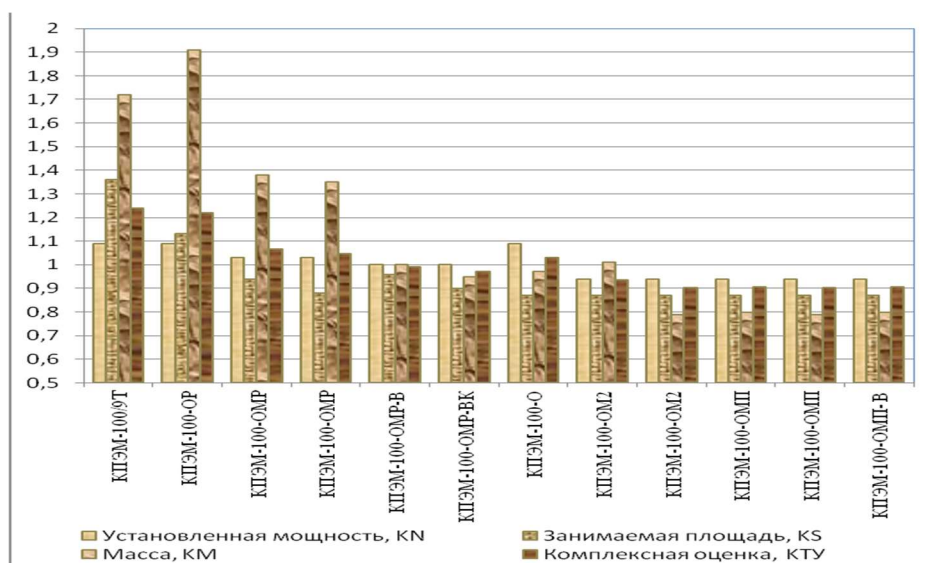


Рисунок 10 - Единичные и комплексные оценки технического уровня пищеварочных котлов Abat емкостью 100 дм<sup>3</sup>

Аналогичный вывод о преимуществе технического уровня следует сделать для стационарного котла и с ручным опрокидыванием с аналоговым управлением для котлов емкостью 160 дм<sup>3</sup> (рисунок 11), прежде всего за счет высоких оценок их массы. Наряду с этим следует отметить, что оценки металлоемкости котлов с электрическим опрокидыванием находятся на очень низком уровне. Это позволяет рекомендовать АО «Чувашторгтехника» совершенствовать этот вид котлов в направлении снижения массы (затрат металла) изделий.

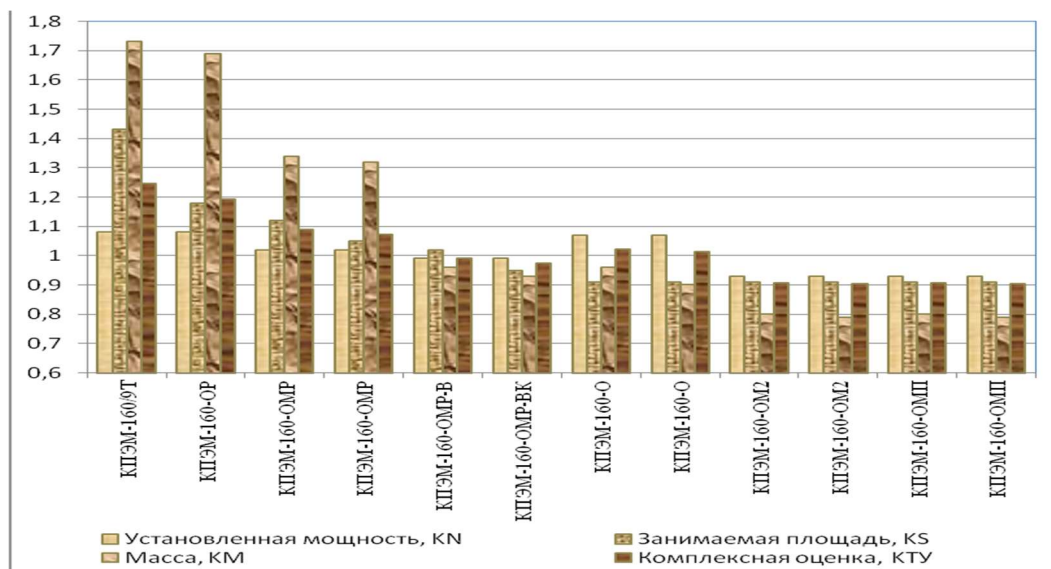


Рисунок 11 - Единичные и комплексные оценки технического уровня пищеварочных котлов Abat емкостью 160 дм<sup>3</sup>

Вывод о высоком техническом уровне стационарных котлов большой емкости и низком уровне котлов с электрическим опрокидыванием подтверждают данные, приведенные на рисунках 12 и 13.

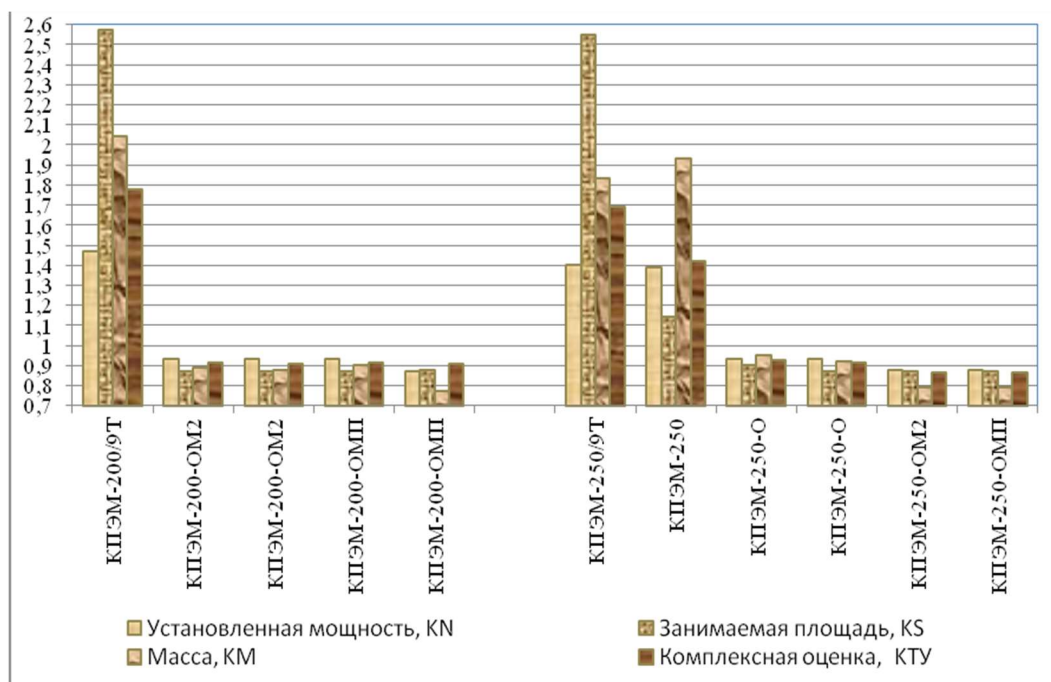


Рисунок 12 - Единичные и комплексные оценки технического уровня пищеварочных котлов Abat большой емкости (200-250 дм<sup>3</sup>) без миксера, со сливным краном

При выборе на рынке товара покупатель руководствуется наряду с качеством и его стоимостью. Он заинтересован купить качественный товар за меньшую цену.

Исходя из логики покупателя, считаем, что ему будет полезна информация: сколько он может заплатить за единицу качества (технического уровня) оборудования, чем меньше, тем лучше.

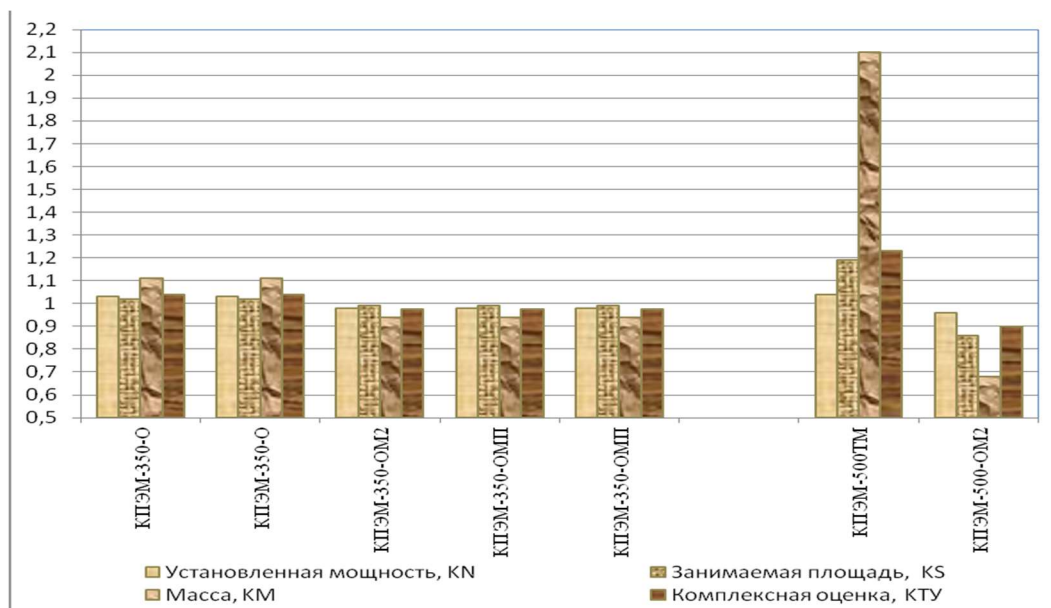


Рисунок 13 - Единичные и комплексные оценки технического уровня пищеварочных котлов Abat большой емкости (350-500 дм³) с миксером и со сливным краном

С другой стороны, при совместном учете оценок удельной цены оборудования и комплексной оценки его основных технических параметров правомерно считать, что перемножение этих оценок даст достоверную информацию – с увеличением/уменьшением каждого сомножителя результат будет повышаться/понижаться. Применение в данном случае квалиметрической методики – расчет средневзвешенной оценки по (2), не даст достоверного результата, так как нет научно обоснованных данных о значимости (для покупателя) стоимости и качества товара при его выборе. Если использовать простую среднюю, то значение обобщенной оценки всегда будет находиться внутри интервала исходных значений.

Исходя из вышеизложенного, предлагаем два способа определения показателя конкурентоспособности анализируемых пищеварочных котлов:

1) как отношение удельной цены к комплексной оценке технического уровня оборудования по формуле:

$$K_{\text{онкур.}} = \frac{C_y}{K_{\text{ТУ}}} \quad , \quad \text{тыс. руб} \quad ; \quad (3)$$

2) как произведение оценки удельной цены в соответствующей группе оборудования на его комплексную оценку технического уровня по формуле:

$$K_{\text{онкур.}} = K_{\text{Ц}} \times K_{\text{ТУ}} \quad . \quad (4)$$

Исходные данные и результаты расчета конкурентоспособности пищеварочных котлов по формулам (3) и (4) приведены в таблице 2.

Приведенные данные позволяют утверждать, что наиболее конкурентоспособны модели котлов емкостью 60 дм³ (л) стационарные котлы (КПЭМ-60/9Т и КПЭМ-60/7Т) и котел с ручным опрокидыванием без миксера (КПЭМ-60-ОР). Конкурентоспособность котлов с ручным опрокидыванием с миксером меньше из-за большей их стоимости. Среди котлов с электрическим опрокидыванием более конкурентоспособна модель без миксера и сливного крана (КПЭМ-60-О).

Среди котлов вместимостью 100 дм³ (л) наиболее конкурентоспособны котлы стационарные и с ручным опрокидыванием без миксера. Комплектация котлов миксером, а также сливным краном (-ОМР-В, -В) снижает показатель конкурентоспособности котлов. Среди котлов с электрическим опрокидыванием более высокие оценки для котла без миксера (КПЭМ-100-О).

Таблица 2 – Показатели конкурентоспособности электрических пищеварочных котлов торговой марки Abat

№ п / п	Модель котла	Удельная цена котла		Оценка техниче ского уровня, К <sub>ту</sub>	Конкурентоспособность	
		Абсолют- ное значение, руб, Ц <sub>у</sub>	Относитель- ное значение в группе (оценка), К <sub>ц</sub>		тыс. руб по формуле (3)	по формуле (4)
	60 дм³ (л)					
1	КПЭМ-60/9Т	3316	2,27	1,197	2,77	2,717
2	КПЭМ-60/7Т	3349	2,24	1,181	2,84	2,652
3	КПЭМ-60-ОР	3131	2,40	1,234	2,54	2,962
4	КПЭМ-60-ОМР	5973	1,26	1,032	5,79	1,300
5	КПЭМ-60-ОМР	6241	1,20	1,005	6,21	1,205
6	КПЭМ-60-ОМР-В	7479	1,00	0,969	7,87	0,969
7	КПЭМ-60-ОМР-ВК	7995	0,94	0,950	8,42	0,893
8	КПЭМ-60-О	6989	1,07	0,989	7,07	1,058
9	КПЭМ-60-ОМ2	11231	0,67	0,913	12,30	0,612
10	КПЭМ-60-ОМП	13823	0,54	0,913	15,14	0,493
11	КПЭМ-60-ОМП	14067	0,53	0,913	15,41	0,484
	100 дм³ (л)					
1	КПЭМ-100/9Т	2395	2,42	1,239	1,93	2,998
2	КПЭМ-100-ОР	2305	2,52	1,221	1,89	3,077
3	КПЭМ-100-ОМР	3891	1,49	1,065	3,65	1,587
4	КПЭМ-100-ОМР	4031	1,44	1,048	3,85	1,509
5	КПЭМ-100-ОМР-В	5111	1,14	0,992	5,15	1,131
6	КПЭМ-100-ОМР-ВК	5444	1,07	0,972	5,60	1,040
7	КПЭМ-100-О	4794	1,21	1,029	4,66	1,245
8	КПЭМ-100-ОМ2	7250	0,80	0,937	7,74	0,750
9	КПЭМ-100-ОМ2	7370	0,79	0,903	8,18	0,713
10	КПЭМ-100-ОМП	8852	0,66	0,905	9,78	0,597
11	КПЭМ-100-ОМП	8990	0,65	0,903	9,96	0,587
12	КПЭМ-100-ОМП-В	9235	0,63	0,905	10,20	0,570
	160 дм³ (л)					
1	КПЭМ-160/9Т	1522	2,34	1,246	1,22	2,916
2	КПЭМ-160-ОР	1556	2,29	1,192	1,31	2,730
3	КПЭМ-160-ОМР	2489	1,43	1,088	2,29	1,556
4	КПЭМ-160-ОМР	2628	1,36	1,071	2,46	1,457
5	КПЭМ-160-ОМР-В	3402	1,05	0,992	3,43	1,042
6	КПЭМ-160-ОМР-ВК	3503	1,02	0,974	3,60	0,993
7	КПЭМ-160-О	3143	1,13	1,022	3,08	1,155
8	КПЭМ-160-О	3342	1,07	1,013	3,30	1,084
9	КПЭМ-160-ОМ2	4696	0,76	0,906	5,18	0,689
10	КПЭМ-160-ОМ2	4770	0,75	0,904	5,28	0,678
11	КПЭМ-160-ОМП	5806	0,61	0,906	6,41	0,553
12	КПЭМ-160-ОМП	5890	0,60	0,904	6,52	0,542
	200 дм³ (л)					
1	КПЭМ-200/9Т	1284	3,12	1,776	0,72.	5,541
2	КПЭМ-200-ОМ2	4186	0,96	0,912	4,59	0,876
3	КПЭМ-200-ОМ2	4252	0,94	0,910	4,71	0,855
4	КПЭМ-200-ОМП	5111	0,78	0,913	5,60	0,712
5	КПЭМ-200-ОМП	5184	0,77	0,910	5,70	0,701



250 дм <sup>3</sup> (л)						
1	КПЭМ-250/9Т	1085	2,56	1,694	0,641	4,337
2	КПЭМ-250	1291	2,15	1,421	0,908	3,055
3	КПЭМ-250-О	2431	1,14	0,926	2,63	1,056
4	КПЭМ-250-О	2487	1,12	0,916	2,72	1,026
5	КПЭМ-250-ОМ2	3714	0,75	0,864	4,30	0,648
6	КПЭМ-250-ОМП	4189	0,66	0,864	4,85	0,570
7	КПЭМ-250-ОМП	4246	0,65	0,864	4,91	0,562
350 дм <sup>3</sup> (л)						
1	КПЭМ-350-О	1884	1,37	1,040	1,81	1,425
2	КПЭМ-350-О	1966	1,32	1,040	1,89	1,373
3	КПЭМ-350-ОМ2	2777	0,93	0,976	2,85	0,908
4	КПЭМ-350-ОМП	3130	0,83	0,976	3,21	0,810
5	КПЭМ-350-ОМП	3184	0,82	0,976	3,26	0,800
500 дм <sup>3</sup> (л)						
1	КПЭМ-500ТМ	1344	2,08	1,229	1,09	2,556
2	КПЭМ-500-ОМ2	4248	0,66	0,898	4,73	0,593

В группе котлов емкостью 160 дм<sup>3</sup> (л) установлены аналогичные данные: конкурентные преимущества котла стационарного, котлов с ручным и электрическим опрокидыванием без миксера.

Для котлов позиции параметрического ряда 200 дм<sup>3</sup> (л) по конкурентоспособности значительно превосходит остальные котлы стационарный котел КПЭМ-200/9Т.

Аналогичный вывод можно сделать и для позиции 250 дм<sup>3</sup> (л). Из опрокидываемых котлов электрическим способом можно отметить как более конкурентоспособные котлы без миксера как со сливным краном, так и без него.

Для опрокидываемых электрическим способом котлов вместимостью 350 дм<sup>3</sup> (л) более конкурентные также котлы без миксера, как со сливным краном, так и без него. (КПЭМ-350-О).

Если необходимо приобрести котел на 500 дм<sup>3</sup> (л), следует отдать приоритет стационарному котлу (КПЭМ-500ТМ).

### Заключение

Представленная в интернете информация о технических характеристиках пищеварочных котлов Abat, поставляемых на рынок, использована для определения их качества и конкурентных преимуществ при приобретении предприятиями общественного питания для организации и обеспечения производственного процесса.

В работе применены методы системного анализа и квалиметрии.

Результаты исследования позволяют констатировать, что наиболее высокие оценки имеют удельные значения основных технических параметров – показатели качества, и их обобщенная оценка – технический уровень, стационарные котлы всего параметрического ряда (60 – 500 дм<sup>3</sup>), с ручным и электрическим способом опрокидывания без миксера емкостью до 160 дм<sup>3</sup>. Котлы с миксером как со сливным краном, так и без него, как правило, имеют оценки технического уровня ниже.

Конкурентные преимущества на рынке пищеварочных котлов Abat были определены с учетом их цены и технического уровня. Установлено, что более высокие показатели конкурентоспособности имеют стационарные модели котлов и опрокидываемые как ручным, так и электрическим методом без миксера (марки -ОР и -О).

Полученные данные позволят предприятиям общественного питания принять оптимальное решение при покупке оборудования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хайрутдинов Н. Г. Бренд Abat. Наша миссия. - Текст: электронный / [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://abat.ru/catalog/pishchevarochnye-kotly/> (дата обращения 20.05.2024).
2. Пищевые котлы АБАТ. - Текст: электронный / [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://abat.ru/catalog/pishchevarochnye-kotly/> (дата обращения 20.05.2024).

3. Топольник, В.Г. Количественная оценка качества пищеварочных котлов российского производства. //Оборудование и технологии пищевых производств: темат. сб. науч. раб. – Донецк; ДонНУЭТ, 2018. – Вып. 4(37). – С. 42-51.

4. Жданко, Д. А. Методы оценки технического уровня машин и оборудования: учеб. пос. / Д. А. Жданко, Т. А. Непарко. – Минск: БГАТУ, 2022. – 112 с. ISBN 978-985-25-0193-4.

5. Прайс-листы. - Текст: электронный / [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://abat.ru/price/> (дата обращения 20.05.2024).

6. Топольник, В.Г. Количественная оценка качества оборудования общественного питания: монография. – Донецк: Кассиопея, 1998. – 196 с. – ISBN 966-7418-22-7.

**Топольник Вера Григорьевна**

ФГБОУ ВО «ДОННУЭТ имени Михаила Туган-Барановского» г. Донецк

Доктор технических наук, профессор

кафедры сервиса и гостиничного дела

283050 г. Донецк. ул. Щорса, 31

Email: [topolnik.v@gmail.com](mailto:topolnik.v@gmail.com)

---

V.G. TOPOLNIK

## **COMPARATIVE ASSESSMENT OF THE TECHNICAL LEVEL OF ABAT ELECTRIC FOODS COOKERS PRODUCED BY JSC «CHUVASHTORGTEHNIKA»**

**Abstract.** *The work presents a model of the composition of a system that includes 58 models of Abat digester boilers for public catering produced by JSC Chuvashorgtehnika. Based on the technical characteristics and cost of the boilers, their quality indicators, a generalized assessment of the technical level and indicators of competitiveness within the system were determined. It has been established that stationary boilers and manually and electrically tipped boilers without a mixer - a device for mixing processed products - have higher ratings of technical level and competitiveness. The results obtained will help the buyer make the best decision on choosing a specific boiler model.*

**Keywords:** *system, public catering, technical parameters, quality indicators, technical level, competitiveness indicator.*

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Khayrutdinov N. G. Brend Abat. Nasha missiya. - Tekst: elektronnyy / [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <https://abat.ru/catalog/pishchevarochnye-kotly/> (data obrashcheniya 20.05.2024).

2. Pishchevyye kotly ABAT. - Tekst: elektronnyy / [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <https://abat.ru/catalog/pishchevarochnye-kotly/> (data obrashcheniya 20.05.2024).

3. Topolnik, V.G. Kolichestvennaya otsenka kachestva pishchevarochnykh kotlov rossiyskogo proizvodstva. //Oborudovaniye i tekhnologii pishchevykh proizvodstv: temat. sb. nauch. rab. – Donetsk; DonNUET, 2018. – Vyp. 4(37). – S. 42-51.

4. Zhdanko, D. A. Metody otsenki tekhnicheskogo urovnya mashin i oborudovaniya: ucheb. pos. / D. A. Zhdanko, T. A. Neparko. – Minsk: BGATU, 2022. – 112 s. ISBN 978-985-25-0193-4.

5. Prays-listy. - Tekst: elektronnyy / [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <https://abat.ru/price/> (data obrashcheniya 20.05.2024).

6. Topolnik, V.G. Kolichestvennaya otsenka kachestva oborudovaniya obshchestvennogo pitaniya: monografiya. – Donetsk: Kassiopeya, 1998. – 196 s. – ISBN 966-7418-22-7.

**Topolnik Vera Grigorievna**

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "DONNUET named after Mikhail Tugan-Baranovsky" Donetsk

Doctor of Technical Sciences, Professor

of the Department of Service and Hotel Business

283050 Donetsk. st. Shchorsa, 31

Email: [topolnik.v@gmail.com](mailto:topolnik.v@gmail.com)

© В.Г. Топольник, 2024

В.В. КУЦ, А.С. ГОРШЕНИНА

## КОНТРОЛЬ СООСНОСТИ ШЕЕК ВАЛОВ МЕТОДОМ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ

**Аннотация.** В данной статье описывается метод определения отклонения от соосности шеек вала относительно базовой поверхности на основе результатов видеосъёмки процесса вращения вала и выделения границ (массивов координат точек) боковых сторон шеек вала на каждом кадре съёмки методами машинного (технического) зрения. Приводятся формулы, позволяющие определить искомую величину отклонения от соосности, а также показан пример расчёта для заданного вала и выполнена оценка величины биения поверхности вала при его закреплении и вращении в трёхкулачковом патроне. Предложенный метод контроля соосности шеек валов с использованием результатов обработки видео изображения процесса вращения контролируемого вала методами машинного зрения позволяет выполнить контроль этого параметра в соответствии с ГОСТ Р 53442-2015.

**Ключевые слова:** машинное зрение, отклонение от соосности, ось вращения вала, центр сечения поверхности шейки вала, математическое моделирование

### Введение

Анализ геометрических размеров и определение погрешностей форм и расположения поверхностей методами машинного зрения – перспективная и актуальная задача производства, решение которой позволит снизить роль человеческого фактора в процессе производства и контроля качества, автоматизирует их, обеспечивает более точный и быстрый анализ объектов с возможностью выявления даже микроскопических дефектов, а также способствует уменьшению затрат. Реализация этого возможна путём фото- или видеосъёмки анализируемых поверхностей с последующей обработкой данных методами машинного зрения. Но, для использования методов машинного зрения на производстве необходимо решение проблем, связанных с определением геометрических свойств контролируемых объектов с заданной точностью, что требует, помимо проработки программно-аппаратной составляющей, позволяющей формировать фото или видео отображение измеряемого объекта в надлежащем качестве, разработки советующих моделей и алгоритмов, с помощью которых могут быть проаннотированы отдельные геометрические свойства отображаемых поверхностей.

Анализ работ в области применения методов машинного зрения (*Machine Vision*) для контроля параметров геометрической точности деталей типа вал показал, что в основном они посвящены контролю линейных размеров валов (диаметров шеек) [1, 2]. В работе [3] для решения данной задачи предлагался метод с использованием перспективных проекций цилиндрических валов с учётом радиальных и тангенциальных искажений, возникающих в цифровой камере, и для измерения точности предлагаемого метода и влияния положения камеры относительно вала, а также других факторов были использованы эксперименты. Аналогичные вопросы рассматривались также в работах [4, 5]. В работах [6, 7] описаны методы измерения диаметра и прямолинейности бесшовных стальных труб, где для этого использовалась пара лазеров с линейной структурой, которые при проецировании на трубу формировали две эллиптические дуги, которые фиксировались камерами и на основе аппроксимации эллипса определялись диаметры поперечного сечения трубы и её прямолинейность. Также интерес представляет публикация [8], где для автоматического контроля состояния микроинструментов в процессе микрофрезерования предлагается метод измерения на станке, позволяющий измерять размер инструмента, радиальное биение шпинделя и получать микроскопическое изображение с полной глубиной фокусировки, как в радиальном, так и в осевом направлении.

В работе [9] рассматривались вопросы совершенствования оценки дефектов формы цилиндрических деталей в поперечном сечении.

Для широкого применения этих методов контроля на практике необходима разработка алгоритмов расчета оценок контролируемых параметров. В частности, данная статья



посвящена расчёту отклонения от соосности шеек вала относительно оси базовой поверхности.

В соответствии с ГОСТ Р 53442-2015 для определения соосности необходимо установить наибольшее расстояние между выявленной средней линией участка нормируемой поверхности шейки вала (выявленной осью по ГОСТ 31254-2004) и осью шейки вала, являющейся базовой поверхностью, под которой, в соответствии с ГОСТ 31254-2004, понимают ось присоединенного цилиндра, являющегося полным цилиндром наименьших квадратов отклонений выявленных точек поверхности базовой шейки вала.

Анализ имеющихся публикаций и патентов, посвящённых способам контроля соосности шеек валов, в частности [10, 11], позволяет утверждать, что они не в полной мере обеспечивают измерение величины отклонения от соосности в соответствии с ГОСТ Р 53442-2015 ввиду сложности определения параметров присоединенного цилиндра, являющегося полным цилиндром наименьших квадратов отклонений выявленных точек поверхности базовой шейки вала и его оси. Ввиду этого имеющиеся известные способы и методы контроля соосности, в том числе и с использованием КИМ, обладают высокой погрешностью определения данного параметра. Поэтому разработка метода контроля соосности шеек валов в соответствии с ГОСТ Р 53442-2015 является актуальной научно-технической задачей.

### Основная часть

При использовании методов машинного зрения расчет величины отклонения от соосности выполняется на основе результатов видеосъёмки процесса вращения вала и выделения границ (координат точек) боковых сторон шеек вала на каждом кадре съёмки (рисунок 1).

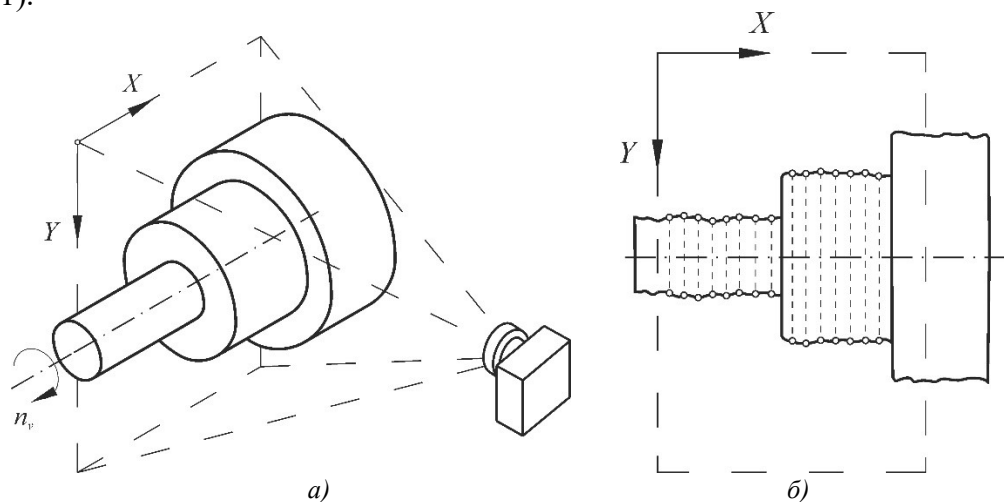


Рисунок 1 – Схема определения границ шеек вала:  
а) расположение камеры; б) выделение точек на кромках

Результатом выделения границ кромок рассматриваемых шеек вала являются сформированные для каждой шейки массивы данных, вида:

$$\left\{ x_j, \left\{ y_{1kj}, y_{2kj} \right\}_{k=1, \overline{K}} \right\}_{j=1, \overline{J}}, \quad (1)$$

где  $x_j$  - координаты  $x$ , соответствующие точкам на верхней и нижней боковой стороне рассматриваемой шейки вала в  $j$ -м сечении, выражены в системе координат изображения (рисунок 2);

$y_{1kj}, y_{2kj}$  - координаты  $y$ , соответствующие проекциям верхней и нижней боковой стороны шейки вала на плоскость  $Y_v O Z_v$ ;

$k$  - номер текущего кадра;

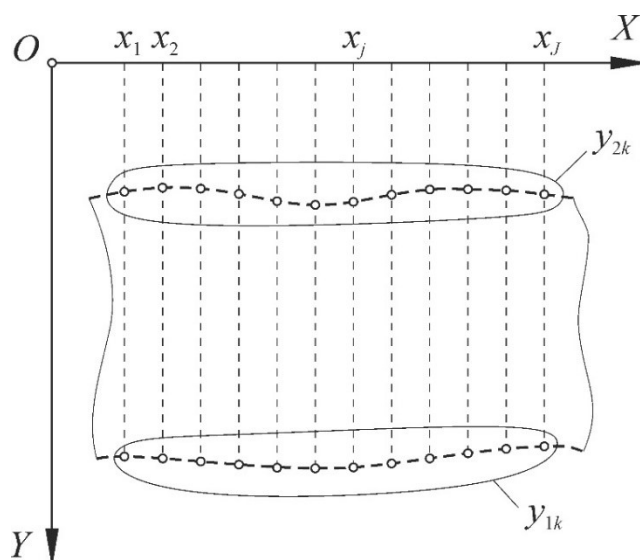


Рисунок 2 – Представление исходных данных в виде массивов точек

$j$  – номер осевого сечения шейки вала;

$K$  – количество кадров съёмки, соответствующее полному обороту вала;

$J$  – количество осевых сечений вала.

Данные массивы должны быть сформированы для каждой рассматриваемой шейки вала.

Исходя из требований ГОСТ Р 53442-2015 определение отклонения от соосности можно рассматривать в виде решения следующих подзадач:

1) определение оси базовой поверхности (базовой шейки вала);

2) выявление средней линии участка нормируемой поверхности шейки вала;

3) расчет наибольшего расстояния между выявленной средней линией участка нормируемой поверхности шейки вала и осью базовой шейки.

Решение первой подзадачи требует определения по ГОСТ 31254-2004 параметров присоединенного цилиндра, являющегося полным цилиндром наименьших квадратов отклонений выявленных точек поверхности шейки вала.

Для этого в каждом сечении определим координаты  $y_{vj}$ , являющиеся оценкой центра вращения вала при контроле (рисунок 3):

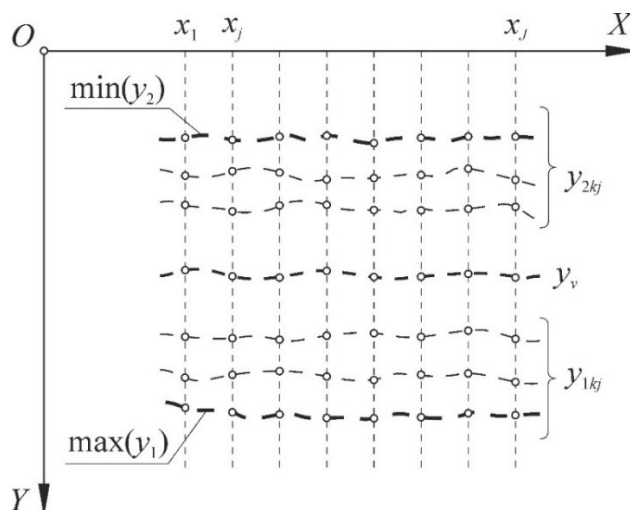


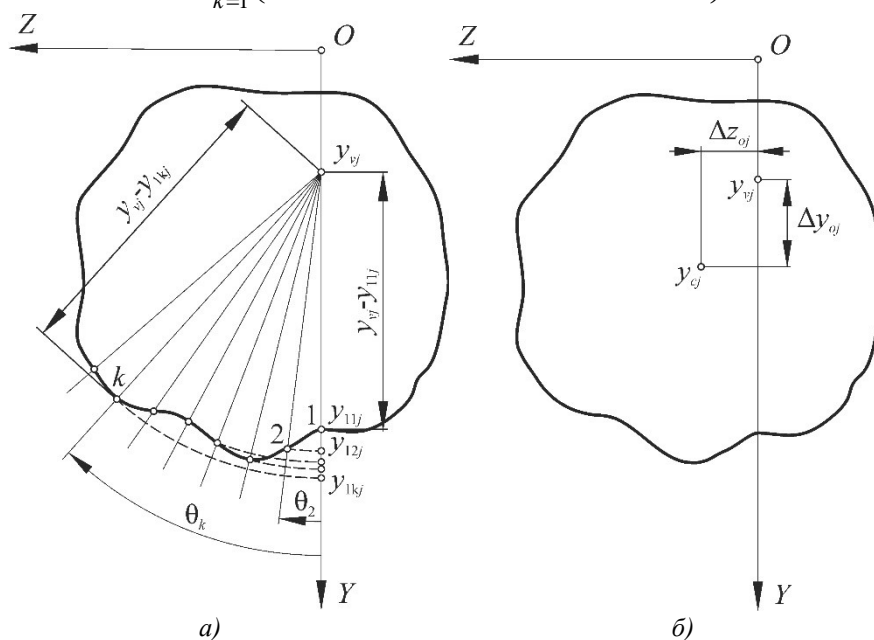
Рисунок 3 – Определение центров вращения сечений шейки вала

$$y_{vj} = \frac{\max\left(\{y_{1kj}\}_{k=1, \overline{K}, j=1, \overline{J}}\right) + \min\left(\{y_{2kj}\}_{k=1, \overline{K}, j=1, \overline{J}}\right)}{2}. \quad (2)$$

Также, определим величины смещений центров сечений шеек вала относительно центра вращения (рисунок 4):

$$\Delta y_{0j} = \frac{2}{K} \sum_{k=1}^K \left( \bar{j}_v \cdot A^{\{4\}}(-\theta_k) \cdot [x_j, y_{1kj} - y_{vj}, 0, 1]^T \right); \quad (3)$$

$$\Delta z_{0j} = \frac{2}{K} \sum_{k=1}^K \left( \bar{k}_v \cdot A^{\{4\}}(-\theta_k) \cdot [x_j, y_{1kj} - y_{vj}, 0, 1]^T \right), \quad (4)$$



**Рисунок 4 – Определение величин смещений центров сечений шеек вала относительно центра вращения:**

а) моделирование сечения вала по его проекциям; б) смещения центра сечения шейки вала относительно центра вращения

где  $A^{\{4\}}(-\theta_k)$  - матрица, задающая поворот системы координат вала относительно оси X

$$A^{\{4\}}(-\theta_k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_k) & \sin(\theta_k) & 0 \\ 0 & -\sin(\theta_k) & \cos(\theta_k) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Выполняя преобразования, формулы (3) и (4) можно представить, как

$$\Delta y_{0j} = \frac{2}{K} \sum_{k=1}^K \left[ \cos(\theta_k) \cdot (y_{1kj} - y_{vj}) \right], \quad (6)$$

$$\Delta z_{0j} = -\frac{2}{K} \sum_{k=1}^K \left[ \sin(\theta_k) \cdot (y_{1kj} - y_{vj}) \right]. \quad (7)$$

На основе значений  $x_j$  и рассчитанных значений  $y_{vj}$ ,  $\Delta z_{0j}$  и  $\Delta y_{0j}$  сформируем массив точек поверхности базовой шейки вала (рисунок 5).

$$\begin{aligned} \bar{r}_{bkj} &= A^{\{3\}}(\Delta z_{0j}) \cdot A^{\{2\}}(y_{vj} + \Delta y_{0j}) \cdot A^{\{4\}}(-\theta_k) \cdot \\ &\cdot [x_j, y_{1kj} - (y_{vj} + r \cdot \sin(\theta_0 + \theta_k)), 0, 1]^T, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $r$  – расстояние от центра сечения шейки вала до центра вращения

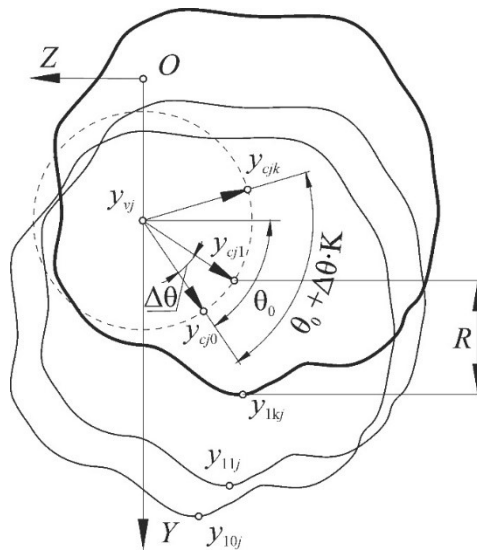


Рисунок 5 – Формирование точек поверхности базовой шейки вала

$$r = \sqrt{\Delta y_{0j}^2 + \Delta z_{0j}^2};$$

$\theta_0$  – начальный угол поворота

$$\theta_0 = \arctan\left(\frac{\Delta y_{0j}}{\Delta z_{0j}}\right);$$

$A^{\{3\}}(\Delta z_{0j})$  – матрица, задающая положение оси цилиндра по оси 0Z

$$A^{\{3\}}(\Delta z_{0j}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta z_{0j} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$A^{\{2\}}(y_{vj} + \Delta y_{0j})$  – матрица, задающая положение оси цилиндра по оси 0Y

$$A^{\{2\}}(y_{vj} + \Delta y_{0j}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & y_{vj} + \Delta y_{0j} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Определяем радиус  $R$  и координаты центра цилиндра, являющегося полным цилиндром наименьших квадратов отклонений выявленных точек поверхности шейки вала  $\bar{r}_{bkj}$  (рисунок 6).

Данная задача сводится к поиску экстремума, а именно точки минимума, следующей функции:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \left\{ \left[ A^{\{2\}}(y_0) \cdot A^{\{3\}}(z_0) \cdot A^{\{5\}}(u_1) \cdot A^{\{6\}}(u_2) \cdot \bar{r}_{bkj} \right]_{YOZ}^2 - R^2 \right\} \rightarrow \min, \quad (9)$$

где  $y_0, z_0$  – координаты центра окружностей цилиндра на плоскости  $Y0Z$  системы координат цилиндра;

$A^{\{2\}}(y_0), A^{\{3\}}(z_0)$  – матрицы установки центра цилиндра в точку с координатами  $(x_0, y_0, z_0)$ ;

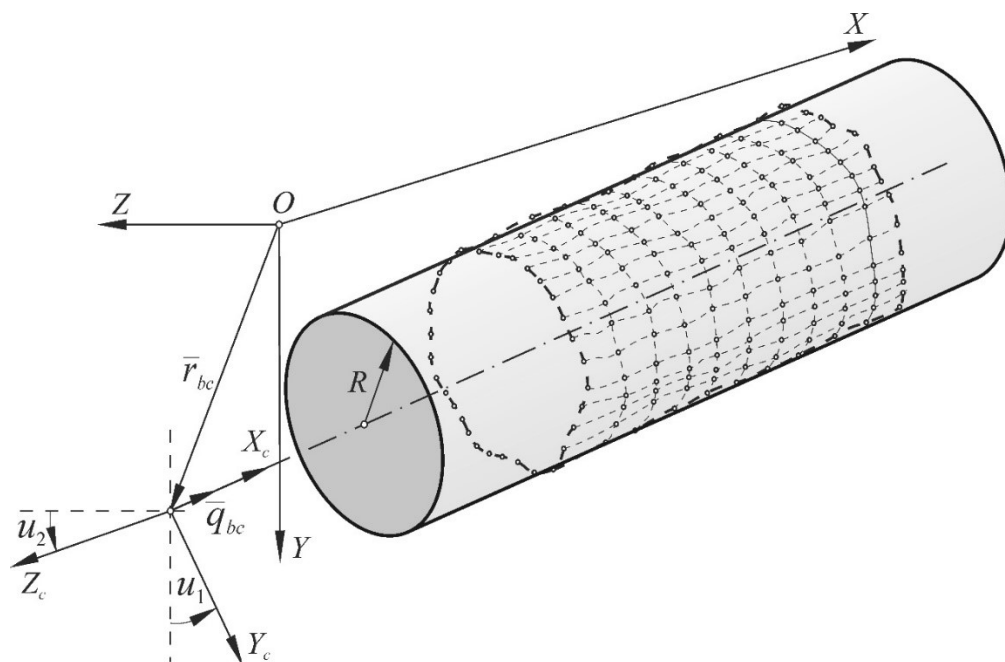


Рисунок 6 – Определение параметров цилиндра, являющегося полным цилиндром наименьших квадратов отклонений выявленных точек поверхности шейки вала

$A^{\{5\}}(u_1)$  – матрица поворота системы координат цилиндра относительно оси  $OY$

$$A^{\{5\}}(u_1) = \begin{bmatrix} \cos(u_1) & 0 & \sin(u_1) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(u_1) & 0 & \cos(u_1) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$A^{\{6\}}(u_2)$  – матрица поворота системы координат цилиндра относительно оси  $OZ$

$$A^{\{6\}}(u_2) = \begin{bmatrix} \cos(u_1) & -\sin(u_1) & 0 & 0 \\ \sin(u_1) & \cos(u_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$u_1, u_2$  – углы поворота системы координат цилиндра соответственно по осям  $OY$  и  $OZ$ .

Выполним представление оси базовой шейки вала в виде точки на оси

$$\bar{r}_{bc} = \left[ A^{\{2\}}(y_0) \cdot A^{\{3\}}(z_0) \cdot A^{\{5\}}(u_1) \cdot A^{\{6\}}(u_2) \right]^{-1} \cdot \bar{0} \quad (10)$$

и направляющего вектора

$$\bar{q}_{bc} = \left[ A^{\{2\}}(y_0) \cdot A^{\{3\}}(z_0) \cdot A^{\{5\}}(u_1) \cdot A^{\{6\}}(u_2) \right]^{-1} \cdot \bar{i}. \quad (11)$$

Решение второй подзадачи выявления средней линии участка нормируемой поверхности шейки вала выполним следующим образом. Для нормируемой шейки поверхности выполним вычисления по формулам (2)-(7) и сформируем векторов центров сечений шеек вала

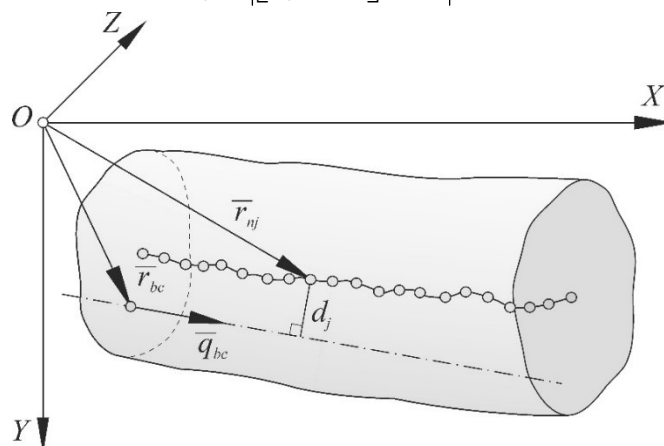
$$\bar{r}_{nj} = [x_j, y_{vj} + \Delta y_{0j}, \Delta z_{0j}, 1]^T. \quad (12)$$

Для решения третьей подзадачи, расчета наибольшего расстояния между выявленной средней линией участка нормируемой поверхности шейки вала и осью базовой шейки, определим расстояния от точек центров сечений нормируемой поверхности шейки вала то базовой оси по формуле (рисунок 7)

$$d_j = \frac{\left| \left[ \bar{r}_{nj} - \bar{r}_{bc} \right] \times \bar{q}_{bc} \right|}{\left| \bar{q}_{bc} \right|} \quad (13)$$

или, при условии, что  $|\bar{q}_{bc}| = 1$ , то по формуле

$$d_j = \left| \left[ \bar{r}_{nj} - \bar{r}_{bc} \right] \times \bar{q}_{bc} \right|. \quad (14)$$



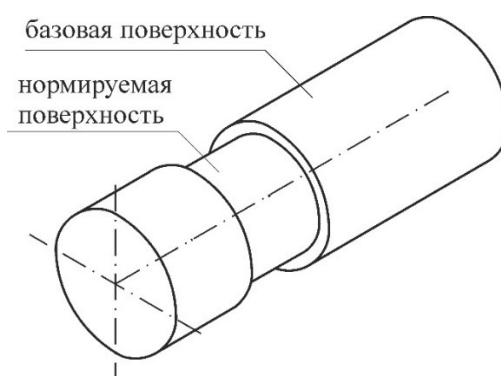
**Рисунок 7 – Определение расстояния от точек центров сечений нормируемой поверхности шейки вала то базовой оси**

За величину отклонения от соосности рассматриваемой поверхности относительно базовой примем наибольшее расстояние

$$\Delta = \max \left( \left\{ d_j \right\}_{j=1, J_n} \right), \quad (15)$$

где  $J_n$  – количество сечений на нормируемой поверхности шейки вала.

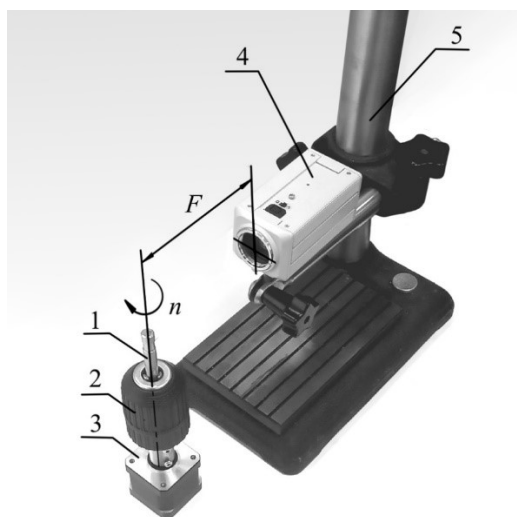
Представленный расчет был апробирован при измерении величины отклонения от соосности шейки вала относительно поверхности базовой шейки (рисунок 8).



**Рисунок 8 – Контролируемый вал**

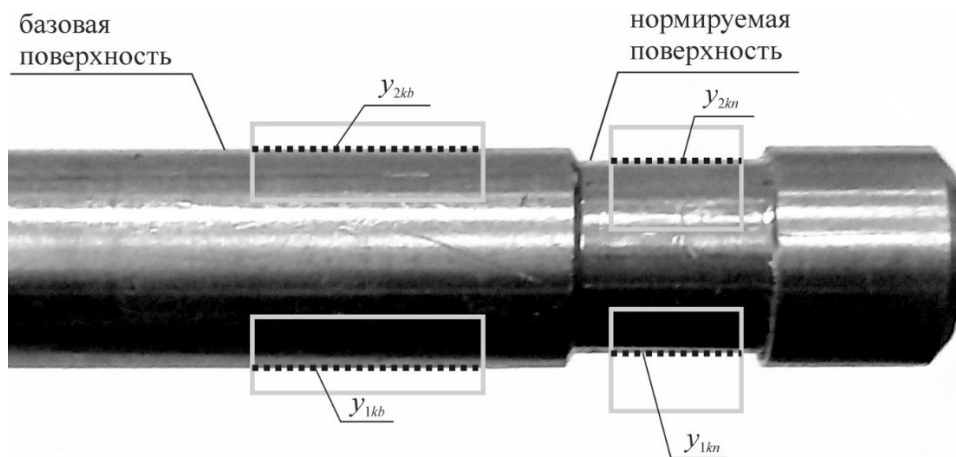
Для формирования видеоизображения процесса вращения вала была использована установка (рисунок 9).

Видеосъемка выполнялась на следующих режимах: частота вращения шагового двигателя 3 об/мин; частота кадров 30 Гц; ширина пикселя 4,2 мкм. Таким образом, было сформировано 600 кадров вращающегося вала с углом поворота вала между кадрами  $\Delta\theta = 360^\circ / 600 \approx 0,6^\circ$ , что составляет 36'. На каждом кадре с помощью разработанного программного обеспечения были выделены границы поверхностей шеек вала (рисунок 10) и сформированы массивы координат их точек в соответствии формулой (1).



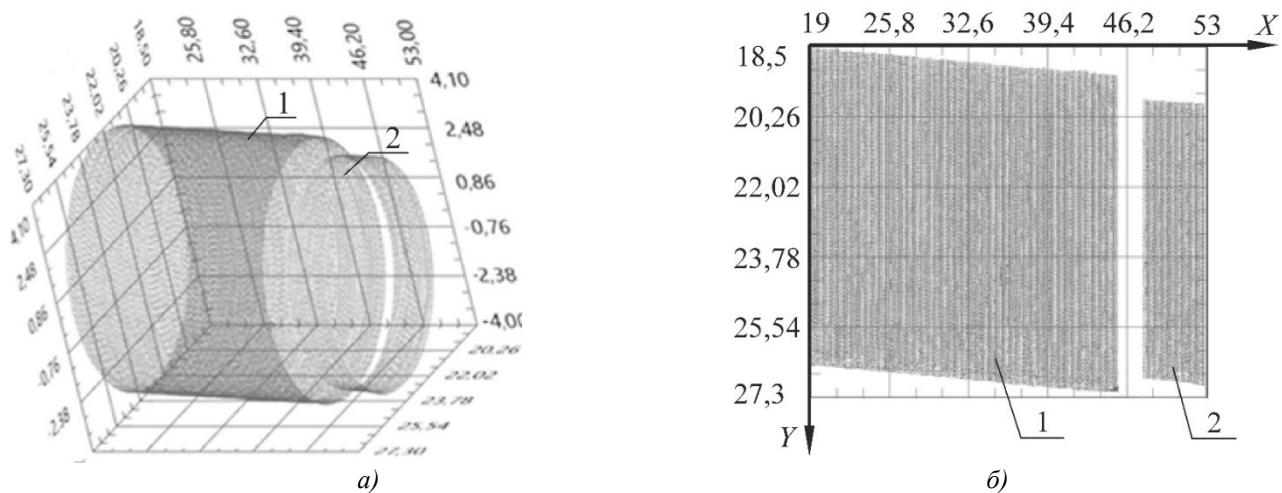
**Рисунок 9 – Установка для осуществления видеосъёмки процесса вращения вала:**

1) контролируемый вал; 2) трехлапчатый патрон; 3) шаговый двигатель; 4) цифровая камера; 5) стойка



**Рисунок 10 – Выделение границ поверхностей шеек вала и формирование массивов координат их точек**

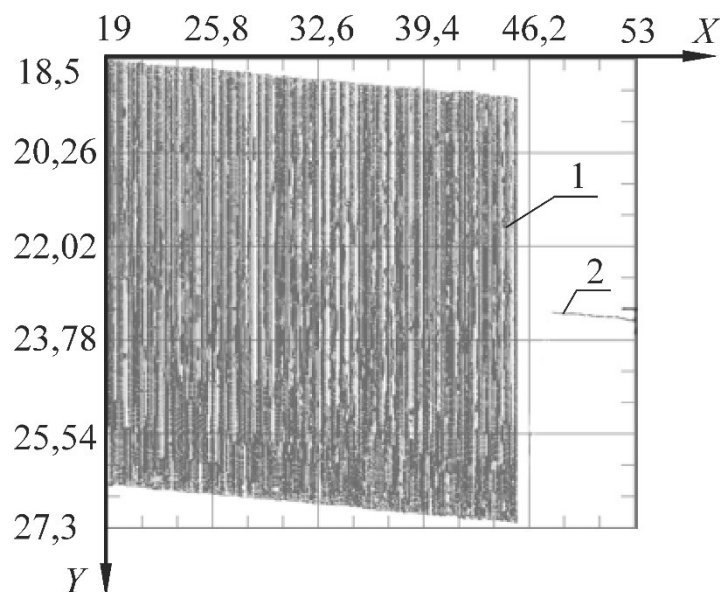
На начальном этапе в соответствии с (8) были рассчитаны точки поверхностей базовой и нормируемой шеек вала (рисунок 11)



**Рисунок 11 – Результат вычисления координат точек поверхностей базовой и нормируемой шеек вала:**

а) вид в изометрии; б) в плоскости XOY; 1) базовая поверхность; 2) нормируемая поверхность

Далее был сформирован массив координат оси (реальной оси) нормируемой шейки вала (рисунок 12), рассчитаны параметры присоединенного к базовой поверхности шейки цилиндра (9), являющегося полным цилиндром наименьших квадратов отклонений выявленных точек поверхности шейки вала.



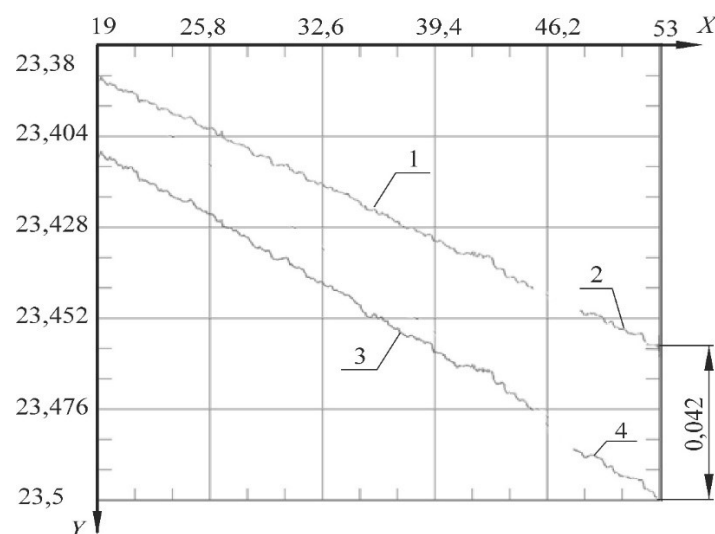
**Рисунок 12 - Результат расчета координат выделенной оси нормируемой шейки вала:**

1) базовая поверхность; 2) выявленная ось нормируемой поверхности

Рассчитанная по формуле (15) величина отклонения от соосности нормируемой поверхности шейки вала составила 9,5 мкм.

Также на основе расчета координат центров вращения вала базовой и нормируемой шеек вала (2) была выполнена оценка величины биения вала при его закреплении и вращении в трёхкулачковом патроне (рисунок 13).

Из рисунка 13 следует, что величина биения вала не превышает 42 мкм на участке фиксируемой поверхности контролируемой детали, однако следует отметить, что разработанный метод расчета величины отклонения от соосности имеет малую чувствительность к величине биения вала в процессе его вращения.



**Рисунок 13 – Оценка биения вала:**

1) центры вращения базовой шейки вала; 2) центры вращения нормируемой шейки вала; 3) выявленная ось базовой шейки вала; 4) выявленная ось нормируемой шейки вала



### **Заключение**

Предложенный метод контроля соосности шеек валов с использованием результатов обработки видео изображения процесса вращения контролируемого вала методами машинного зрения позволяет выполнить контроль этого параметра в соответствии с ГОСТ Р 53442-2015. Измерение отклонения от соосности контролируемого вала, на созданной авторами установке показал, что она не превышает 4,5 мкм на участке фиксируемой поверхности вала. Рассчитанная величина биения вала при его закреплении и вращении не превышает 42 мкм. Дальнейшие исследования будут направлены на установление величины погрешности данного метода и установлении влияния на точность определения отклонения от соосности режимов видеосъемки и параметров применяемого оборудования.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Холодилин, И. Ю. Система контроля геометрии полуцилиндров трубы стана 1020 / И. Ю. Холодилин, Д. Ю. Хрюкин, М. А. Григорьев // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2021. – Т. 17, № 2. – С. 100-109. – DOI 10.17122/1999-5458-2021-17-2-100-109. – EDN WATNKA.
2. Бесконтактный способ измерения геометрических размеров тел / Ю. А. Ашмарин, А. А. Виноградова, П. П. Коваленко [и др.] // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. – 2008. – № 48. – С. 90-94. – EDN JVWHHD.
3. G. Wei and Q. Tan, "Measurement of shaft diameters by machine vision," *Appl. Opt.* 50, 3246-3253 (2011).
4. K. Takesa, H. Sato, Y. Tani, and T. Sata, "Measurement of diameter using charge coupled device (CCD)," *CIRP Ann.* 33, 377–381 (1984)
5. Li, B. Research on geometric dimension measurement system of shaft parts based on machine vision. *J Image Video Proc.* 2018, 101 (2018). <https://doi.org/10.1186/s13640-018-0339-x>
6. C. Sun, Q. You, Y. Qiu, and S. Ye, "Online machine vision method for measuring the diameter and straightness of seamless steel pipes," *Opt. Eng.* 40, 2565–2571 (2001).
7. Liu, S.; Tan, Q.; Zhang, Y. Shaft Diameter Measurement Using Structured Light Vision. *Sensors* **2015**, *15*, 19750-19767. <https://doi.org/10.3390/s150819750>
8. Liu, Xiaoru & Zhang, Xi & Shang, Bo & Chi, Xianliang. (2015). Study on Vision based On-machine Micro Tool Measurement Method. 10.2991/jimet-15.2015.202.
9. Poor shape precision of rotational bodies / V. E. Ovsyannikov, G. N. Shpitko, R. A. Ziganshin, V. I. Nekrasov // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. – 2019. – Vol. 8, No. 12. – P. 4599-4601. – DOI 10.35940/ijitee.L3842.1081219. – EDN CGEBCY.
10. Патент № 2819109 С1 Российская Федерация, МПК G01B 5/25. Способ контроля соосности валов: № 2023122913: заявл. 04.09.2023; опубл. 14.05.2024 / Ю. В. Белоусов, И. А. Мамиева; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы". – EDN UNWZJN.
11. Патент № 2748150 С1 Российская Федерация, МПК G01B 5/25. Способ контроля соосности валов: № 2020105912: заявл. 07.02.2020; опубл. 19.05.2021 / Ю. В. Белоусов, В. В. Кириловский, И. А. Мамиева; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Российский университет дружбы народов". – EDN JUKUSS.

**Куц Вадим Васильевич**

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»  
Доктор технических наук, профессор кафедры машиностроительных технологий и оборудования  
305040, Курская Область, г. Курск, ул. 50 лет Октября, д.94  
E-mail: kuc-vadim@yandex.ru

**Горшенина Анастасия Сергеевна**

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»  
Студентка кафедры машиностроительных технологий и оборудования  
305040, Курская Область, г. Курск, ул. 50 лет Октября, д.94  
E-mail: sh3gorshenina@yandex.ru

---

V.V. KUTS, A.S. GORSHENINA

### **CONTROL OF ALIGNMENT OF SHAFT JOURNALS BY THE METHOD OF MACHINE VISION**

**Abstract.** This article describes a method of determining the deviation from alignment of shaft axles relative to the base surface on the basis of the results of video recording of the shaft rotation process and selection of contours (arrays of point coordinates) of the sides of the shaft axles on each frame of shooting by machine (technical) vision

*methods. The formulas allowing to determine the sought value of the deviation from alignment are given, and also an example of calculation for a given shaft is shown and the value of runout of the shaft surface at its fixing and rotation in a three-cam cartridge is estimated. The proposed method of control of shaft axes alignment using the results of video image processing of the process of rotation of the controlled shaft by machine vision methods allows to perform control of this parameter in accordance with GOST R 53442-2015.*

**Keywords:** machine vision, deviation from alignment, shaft rotation axis, center of the shaft axes surface cross-section, mathematical modeling.

## BIBLIOGRAPHY

1. Holodilin, I. YU. Sistema kontrolya geometrii polucilindrov truby stana 1020 / I. YU. Holodilin, D. YU. Hryukin, M. A. Grigorev // *Elektrotekhnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy*. – 2021. – T. 17, № 2. – S. 100-109. – DOI 10.17122/1999-5458-2021-17-2-100-109. – EDN WATNKA.
2. Beskontaktnyj sposob izmereniya geometricheskikh razmerov tel / YU. A. Ashmarin, A. A. Vinogradova, P. P. Kovalenko [i dr.] // *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki*. – 2008. – № 48. – S. 90-94. – EDN JVWHHD.
3. G. Wei and Q. Tan, "Measurement of shaft diameters by machine vision," *Appl. Opt.* 50, 3246-3253 (2011).
4. K. Takesa, H. Sato, Y. Tani, and T. Sata, "Measurement of diameter using charge coupled device (CCD)," *CIRP Ann.* 33, 377–381 (1984)
5. Li, B. Research on geometric dimension measurement system of shaft parts based on machine vision. *J Image Video Proc.* 2018, 101 (2018). <https://doi.org/10.1186/s13640-018-0339-x>
6. C. Sun, Q. You, Y. Qiu, and S. Ye, "Online machine vision method for measuring the diameter and straightness of seamless steel pipes," *Opt. Eng.* 40, 2565–2571 (2001).
7. Liu, S.; Tan, Q.; Zhang, Y. Shaft Diameter Measurement Using Structured Light Vision. *Sensors* 2015, 15, 19750-19767. <https://doi.org/10.3390/s150819750>
8. Liu, Xiaoru & Zhang, Xi & Shang, Bo & Chi, Xianliang. (2015). Study on Vision based On-machine Micro Tool Measurement Method. 10.2991/jimet-15.2015.202.
9. Poor shape precision of rotational bodies / V. E. Ovsyannikov, G. N. Shpitko, R. A. Ziganshin, V. I. Nekrasov // *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. – 2019. – Vol. 8, No. 12. – P. 4599-4601. – DOI 10.35940/ijitee.L3842.1081219. – EDN CGEBCY.
10. Patent № 2819109 C1 Rossijskaya Federaciya, MPK G01B 5/25. Sposob kontrolya soosnosti valov: № 2023122913: zayavl. 04.09.2023: opubl. 14.05.2024 / YU. V. Belousov, I. A. Mamieva; zayavitel Federalnoe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Rossijskij universitet druzhby narodov imeni Patrisa Lumumby". – EDN UNWZJN.
11. Patent № 2748150 C1 Rossijskaya Federaciya, MPK G01B 5/25. Sposob kontrolya soosnosti valov: № 2020105912: zayavl. 07.02.2020: opubl. 19.05.2021 / YU. V. Belousov, V. V. Kirilovskij, I. A. Mamieva; zayavitel Federalnoe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Rossijskij universitet druzhby narodov". – EDN JUKUSS.

### Kuts Vadim Vasilyevich

Southwestern State University  
 Doctor of Technical Sciences, Professor of the  
 Department of Mechanical Engineering Technologies  
 and Equipment  
 94 50 let Oktyabrya str., Kursk, Kursk Region, 305040  
 E-mail: kuc-vadim@yandex.ru

### Gorshenina Anastasia Sergeevna

Southwestern State University  
 Student of the Department of Mechanical Engineering  
 Technologies and Equipment  
 94 50 let Oktyabrya str., Kursk, Kursk Region, 305040  
 E-mail: sh3gorshenina@yandex.ru

© В.В. Куц, А.С. Горшенина, 2024

# **МАТЕРИАЛЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «ДИНАМИКА, НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ МЕХАНИЧЕСКИХ И БИОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ»**

УДК 621.9.06

DOI: 10.33979/2073-7408-2024-367-5-122-133

А.В. АНДРЕЕВ, Ю.О. СТРЕЛЯНАЯ

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В РЕВЕРС-ИНЖИНИРИНГЕ НА ПРИМЕРЕ СУДОВОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ**

**Аннотация.** *Реверс-инжиниринг стал эффективным инструментом импортозамещения в отечественной промышленности. Эта технология позволяет не просто копировать готовые решения, но и улучшать их, адаптировать для конкретных задач и отраслей.*

*Реверс-инжиниринг – это стратегический процесс, при котором конструктора, совместно с учёными и технологами изучают узел, в который входит деталь, разрабатывают модель, моделируют процесс при разных нагрузках и внешних факторах. К сожалению, не всегда есть возможность доступа к узлу (агрегату) в состав которого входит деталь, а значит смоделировать работу детали и то, как погрешности при ее изготовлении повлияют на основные параметры узла (агрегата) в целом.*

*В этом случае высока вероятность брака детали, снижения ее ресурса, ухудшения характеристик узла (агрегата), при этом специалист по реверс-инжинирингу чаще всего не располагает необходимыми теоретическими и практическими навыками в той или иной области.*

*В описываемом техническом решении предлагается простой и эффективный способ (с помощью редактора Exel) смоделировать основные параметры судовой холодильной установки (провизионной камеры), а также характер их изменения в зависимости от величины погрешностей в размерах цилиндрико-поршневой группы при реверс-инжиниринге полугерметичного одноступенчатого поршневого компрессора двойного действия, работающего на фреоне, имея минимальную информацию лишь о том, какая продукция предусмотрена для хранения в провизионной камере.*

**Ключевые слова:** *давление, испаритель, конденсатор, компрессор, политропный процесс, температура, термодинамический цикл, хладагент, цилиндро-поршневая группа.*

### **Введение**

В условиях новой реальности импортозамещение обеспечивает выживаемость отечественной промышленности и выводит её на новый виток развития. Реверс-инжиниринг стал эффективным инструментом в достижении этих целей. Ведь эта технология позволяет не просто копировать готовые решения, но и улучшать их, адаптировать для конкретных задач и отраслей, что в свою очередь возможно лишь при комплексном подходе к процессу проектирования и изготовления.

Комплексный подход, при всем прочем, подразумевает не только компетенции в области инженерной графики и непосредственно построения моделей с помощью систем автоматизированного проектирования, но и наличие у специалиста хотя-бы минимально-необходимого набора знаний в конкретной области науки техники.

В связи с этим наиболее актуализируются следующие вопросы:

- Какими компетенциями должна обладать организация, чтобы добиться успеха в области обратного инжиниринга?

- С какими сложностями сталкиваются инжиниринговые компании в России?

К сожалению, в реверс-инжиниринге часто отсутствует стратегия, т.е., например, это процесс, при котором, конструкторское бюро, получив эскиз или вышедшую из строя деталь от заказчика, образмерило её, разработало 3D модель, конструкторскую документацию и изготовило образец, который в итоге через месяц вышел из строя. Причина этому кроится, как правило, в том, что результат, ограничивающийся 3D-моделью и конструкторской документацией – лишь часть цикла.

Реальный же реверс-инжиниринг – это вариант, когда стратегия есть: т.е. конструктора, совместно с учёными и технологами изучили узел, в который входит деталь, разработали модель, смоделировали процесс при разных нагрузках и обнаружили, что, во-первых,

исходная деталь скорее всего имеет существенный износ, а во-вторых, если внести небольшие корректировки в узел, это повысит его надёжность и увеличит производительность установки на 15 % или же наоборот – какие погрешности допущенные и неизбежные при изготовлении приведут к снижению производительности и выходу из строя и только после этого изготовили деталь и передали в производство.

Из всей массы проблемных вопросов, связанных с комплексным подходом в решении задач промышленных организаций, с применением аддитивных технологий отдельного внимания требует проблема отсутствия возможности доступа к узлу или агрегату в состав которого входит вновь проектируемая деталь (механизм), при этом заказчик (зачастую находящийся на другом конце страны), как правило, не взаимодействует с инженеринговой компанией в вопросах оказания помощи. Это может быть информационная поддержка или предоставление соответствующих ресурсов, например, испытательных стендов - все то, что связано увеличению издержек и сроков изготовления детали. Заказчик заинтересован прежде всего в оперативности и финансовой экономичности.

В данной ситуации специалисту по реверс-инжинирингу, не обладающему компетентностью в конкретной отрасли (что чаще всего имеет место быть) приходится изучать большой объем нормативно-технической документации, ГОСТов, искать на электронных ресурсах готовые расчеты узлов и агрегатов, осваивать специализированное программное обеспечение, подбирать (по сути – угадывать) значения оптимальных параметров, допусков, посадок, что в свою очередь требует значительных временных, а значит и финансовых затрат.

### **Основная часть**

В описываемом решении предлагается простой и эффективный способ с помощью редактора Excel (доступного для большинства, не требующего отдельного освоения и не занимающего большой объем памяти) смоделировать основные параметры судовой холодильной установки (провизионной камеры), а также характер их изменения в зависимости от величины погрешностей в размерах цилиндрической группы при реверс-инжиниринге одноступенчатого поршневого компрессора двойного действия, работающего на фреоне, имея минимальную информацию лишь о том, какая продукция предусмотрена для хранения в провизионной камере и самые общие представления об этой установке.

В решении акцентируется внимание не на саму технологию проектирования CAD – модели и разработку конструкторской документации, а на то, как качество вновь проектируемой и впоследствии изготовленной нами детали окажет влияние на работу узла или агрегата в целом.

Целью данного расчета не является точность воспроизводства параметров т.к. значения участвующих в нем различных коэффициентов и параметров усреднены и подобраны исходя из обеспечения оптимального КПД и общепринятых значений в расчетах аналогичных компрессоров. Основная цель – это сориентировать специалиста в рамках определенных основных показателей и проанализировать характер изменения этих показателей в зависимости от отклонений в размерах цилиндрической группы, что позволит спрогнозировать взаимозаменяемость и вести диалог с заказчиком на «профессиональном» языке.

Существует достаточно много программ для моделирования циклов холодильных машин, например, такие как «Cycle-Tempo» (Нидерланды), «CoolPack» (Германия), «Solkan» (Германия), «CoolSelector» (Дания), «ANSYS Fluent» (США), «COMSOL Multiphysics» (Швеция), «Bitser» (компания Трейд Групп») и др. [1-7]

Вышеуказанные программы обладают широкой линейкой хладагентов, гибким и функциональным интерфейсом, оптимальным набором рабочих параметров с необходимыми диапазонами, однако всех их объединяет то, что расчет производится на базе существующих типов компрессоров или строго унифицированных характеристик с учетом параметрических рядов ГОСТ (ISO). Данные программы не адаптированы к условиям большого разнообразия специфических и, как следствие, «не совсем корректных» задач реверс-инжиниринга, к тому же любое программное обеспечение требует изучения и освоения. Поэтому основной задачей предлагаемого расчета является максимальное упрощение параметризации объекта, детализированно не вдаваясь в область термодинамики и устройства холодильных машин.

**Постановка задачи.** Спроектировать и изготовить компрессор на основе имеющегося поршневого одноступенчатого полугерметичного компрессора двойного действия немецкой фирмы Bitser неизвестной модификации (с отсутствующей маркировкой на корпусе и нормативно-технической документацией), который бы обеспечивал такие же требуемые энергокинематические и термодинамические параметры холодильной установки (рисунок 1).

**Постановка проблемы:**

1. Существующие производственные возможности не позволяют с достаточной точностью обеспечить изготовление цилиндра и поршня с заданным диаметром (корпус компрессора планируется изготовить с помощью 3-D печати, материал-чугун).
2. Отсутствуют сведения о влиянии полученных при изготовлении отклонений в размерах цилиндра-поршневой группы на основные эксплуатационные параметры холодильной установки (расход хладагента, холодопроизводительность).
3. Количество неизвестных значений более чем 3 раза превышает количество уравнений для расчета компрессора.

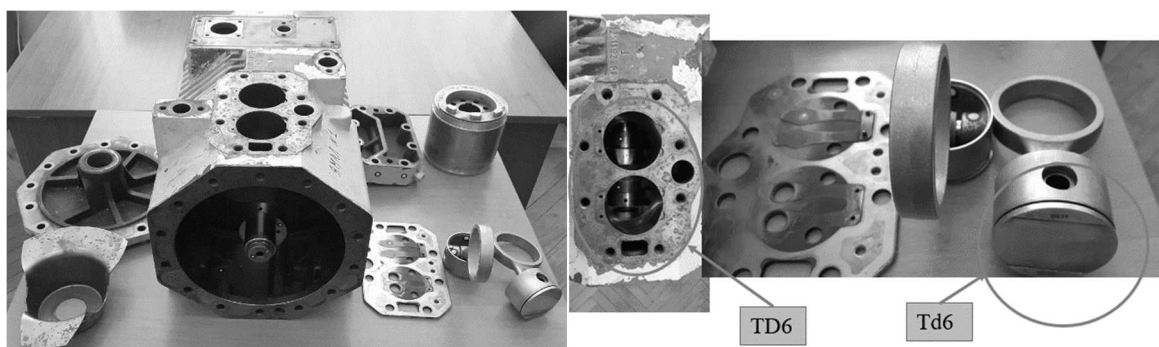


Рисунок 1 – Компрессор судовой холодильной установки фирмы Bitser

**Исходные данные.** Имеется в наличии одноступенчатый двухцилиндровый (двойного действия) полугерметичный компрессор, перекачивающий фреон в составе судовой холодильной установки (провизионной камеры для хранения незамороженных продуктов) работающей по циклу парокомпрессионной холодильной машины с естественным воздушным охлаждением конденсатора (при температуре окружающего воздуха не выше  $55^{\circ}\text{C}$ ) (рисунок 2).

Размеры цилиндра-поршневой группы: диаметр цилиндра - 55.004мм.; диаметр поршня – 55,0021мм., Рабочий ход поршня (измеренный по следу от трения на внутренней поверхности цилиндра) – 40 мм. Материал корпуса – Чугун.

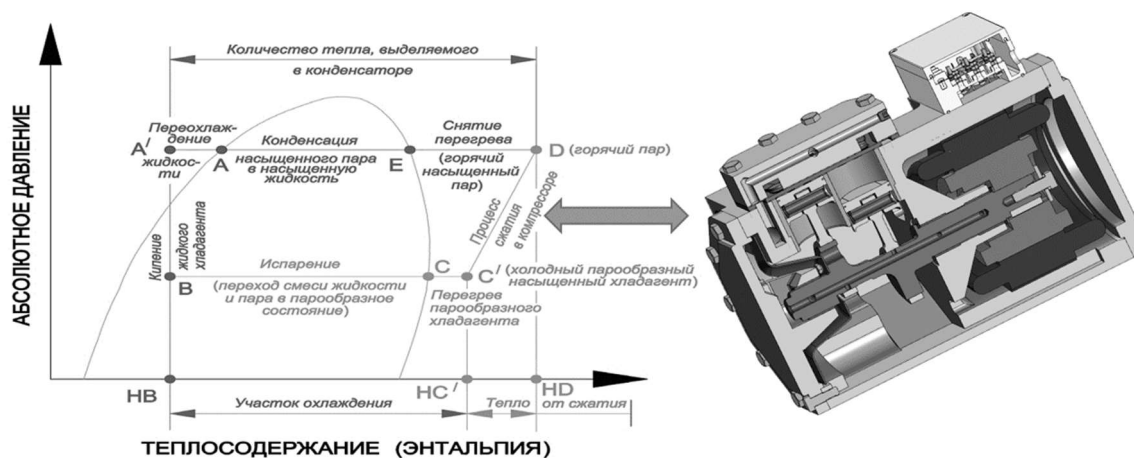


Рисунок 2 – Термодинамический цикл парокомпрессионной холодильной машины

На этапе получения исходных данных выполнены следующие работы:

- разборка готового изделия на детали;
- снятие размеров;

- определение применяемых в производстве материалов;

На этапе проектирования с помощью системы автоматизированного проектирования выполнено:

- трехмерное сканирование;
- получение CAD-модели;
- разработка чертежей (рисунок 3).

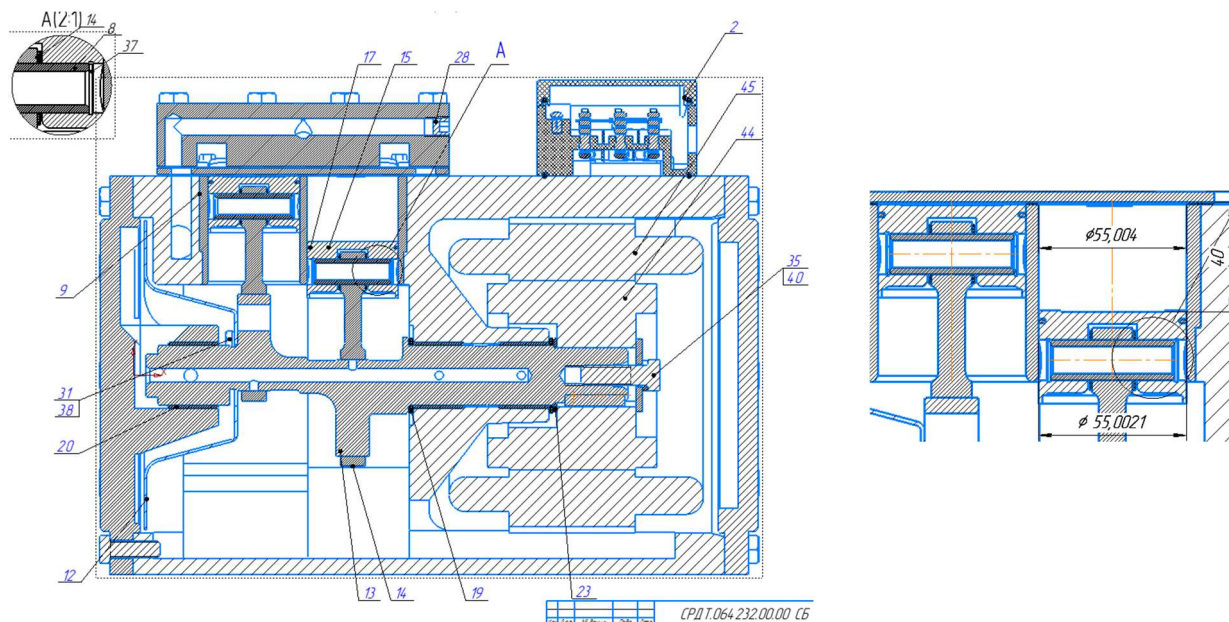


Рисунок 3 - Сборочный чертеж компрессора, диаметр цилиндра и поршня

**Неизвестные данные.** Характеристики компрессора: давление и температура хладагента на входе и выходе из компрессора, производительность, показатели политропы при сжатии (расширении).

Характеристики холодильной машины: размеры, температура фреона, диапазон регулирования подачи терморегулирующим вентилем, холодопроизводительность, температура воздуха в охлаждаемой камере, тип фреона и т.д.

Предварительный расчет и моделирование основных параметров компрессора и судовой холодильной установки проводится на этапе проведения работ по созданию рабочей модели, подгонки и проверки.

#### Порядок построения алгоритма программы.

##### 1 этап. Выбор хладагента для холодильной установки [8].

При повышенных требованиях к экономии затрат электроэнергии на единицу холодопроизводительности следует подбирать хладагент с минимальными финансовыми затратами. Но эксплуатационные показатели и анализ мощности указывает на одинаковые расходные характеристики всех распространенных хладагентов. Следовательно, экономичность и коэффициент полезного действия не являются основными характеристиками при выборе холодильных агрегатов. Экономия достигается при уменьшении затрат на размещение, массу и упрощение обслуживания холодильного оборудования. Еще одним значительным фактором при приобретении холодильных установок является безопасность и стоимость хладагента.

1.1 Проведя анализ критериев выбора холодильных агентов, а также изучив материалы на электронных ресурсах по параметрам аналогичных компрессоров фирмы Bitser, из перечня выбираем оптимальные по характеристикам и самые распространенные марки фреонов:

R12 ( $\text{CCl}_2\text{F}_2$  – дифтордихлорметан), R22 ( $\text{CHF}_2\text{Cl}$  – дифторхлорметан), R134 ( $\text{CF}_3\text{CH}_2\text{F}$  – гидрофторуглерод), R404a ( $\text{HCF}$ - гидрофторугл. соед.), R600 ( $\text{CH}(\text{CH}_3)_3$ - изобутан) [8].

1.2 Вносим в таблицу из ГОСТ ИСО 15584 -2015 «Свойства хладагентов» справочные данные для указанных типов фреонов (температура, давление кипения, молярная масса) (таблица 1).

1.3 Строим графики зависимостей давлений и температур кипения, максимально приближая линию тренда при помощи полиномиальной функции к графикам доводя коэффициент достоверности аппроксимации до единицы, формируя уравнения линий тренда в 6 степени с 30 знаками после запятой и тем самым обеспечивая достаточную точность интерполяции (максимальное расхождение в крайних точках – не более  $0,5^0\text{C}$ ) (рисунок 4).

Таблица 1 – Свойства хладагентов

R404a		R600		R134		R12		R22	
Ткип.	Ркип.	Ткип.	Ркип.	Ткип.	Ркип.	Ткип.	Ркип.	Ткип.	Ркип.
-30	1,04	5	0,89	-10	1,01	-15	1	-25	1,05
-25	1,53	10	1,21	-5	1,47	-10	1	-20	1,46
-20	2,02	15	1,62	0	1,93	-5	2	-15	2,01
и т.д.....									



Рисунок 4 – График зависимостей давлений и температур кипения хладагентов

1.4. Зная молярную массу хладагента, вычисляется индивидуальная газовая постоянная  $R'$ ; Дж/(кг к) (1) [8].

$$R' = \frac{\mu}{R}, \quad (1)$$

где  $\mu$  – молярная масса хладагента, гр/моль;

$R$  – универсальная газовая постоянная (равна 8,314 Дж/(моль к)).

**2 этап.** Расчет параметров компрессора на основе имеющихся данных [9,10].

2.1 Расчет рабочего объема цилиндра ступени –  $V_p$ , мм<sup>3</sup> (2) [9].

$$V_p = \frac{\pi}{4} D^2 \left( \frac{S}{d} \right) D, \quad (2)$$

где  $D$  – диаметр цилиндра, мм.

$d$  – диаметр поршня, мм.

$S$  – рабочий ход поршня, мм.

2.2 Расчет объемной производительности компрессора (теоретическая подача) –  $v_{1T}$ ; м<sup>3</sup>/ч (3) [10].

$$v_{1T} = V_p n z, \quad (3)$$

где  $V_p$  – рабочий объем цилиндра, мм<sup>3</sup>;

$n$  – частота вращения приводного двигателя, об/мин;

$z$  – число цилиндров, ед.

**3 этап.** Подбор давления и температуры хладагента [10-14].

3.1 Давление фреона в испарителе холодильной установки  $P_{исп}$ , кг/см<sup>2</sup> (далее по тексту параметры фреона будут оговариваться только физическими величинами – давление, температура и т.д.) [11].

Согласно ГОСТ 16317-87, а также требований СанПиН 2.3.2.1324-03 температура в камере с незамороженными продуктами  $T_{кам}$ , <sup>0</sup>C должна быть в пределах от 2 до 7<sup>0</sup>C (для свежих овощей не более 12<sup>0</sup>C).

Из теоретических курсов и практических расчетов холодильных установок (далее по тексту если не указана ссылка на ГОСТ подразумевается, что источником информации



являются указанные ресурсы) известно, что при нормальной эксплуатации температурный напор  $\Delta T_n$ , т. е. разность между температурами воздуха в охлаждаемом объекте и кипения холодильного агента, принимают 7...10°C. В некоторых случаях экономически оправданными являются напоры 5° С (для камер охлаждения фруктов) и 12...20° С (судовые и бытовые установки).

Выбрав значения  $\Delta T_n = 12^0\text{C}$  (далее по тексту выбор конкретных значений параметров из указанных диапазонов не оговаривается) производится предварительный расчет температуры кипения в испарителе  $T_{\text{кип гост}}, ^0\text{C}$  и подбирается давление насыщения  $P_{\text{исп. кг/см}^2}$  таким образом, чтобы соответствующая ему температура насыщения  $T_{\text{кип}}, ^0\text{C}$  была близка по значению температуре  $T_{\text{кип гост}}, ^0\text{C}$ . Показателем корректности выбора  $P_{\text{исп. кг/см}^2}$  является величина ошибки  $\Delta, ^0\text{C}$ , показывающая разность между  $T_{\text{кип}}$  и  $T_{\text{кип гост}}$  не более 1 °С, о чем будет сигнализировать зеленая – «соответствует», желтая – «проверь значение» и красная – «не соответствует» подсветка соответствующей ячейки в индикаторном режиме на пользовательском интерфейсе (рисунок 6) и детально (с указанием конкретных значений этой разности привязанной к соответствующему давлению в испарителе) на интерфейсе настроек (рисунок 7).

### 3.2 Расчет температуры хладагента на входе в компрессор [12].

С целью обеспечения оптимального КПД значения перегрева фреона в испарителе (разность между  $T_{\text{кип}}, ^0\text{C}$  и температурой выхода из испарителя  $T_1, ^0\text{C}$ ), а также за счет охлаждения обмоток статора двигателя  $\Delta T_d$  устанавливают соответственно в пределах  $\Delta T_n = 5...10^0\text{C}$ ,  $\Delta T_d = 10...15^0\text{C}$ .

Выбрав значения из указанных диапазонов производится расчет перегрева хладагента  $\Delta T_{\text{пп}}, ^0\text{C}$  (4)

$$\Delta T_{\text{пп}} = \Delta T_n + \Delta T_d, \quad (4)$$

где  $\Delta T_n$  – подогрев хладагента в испарителе, °С (принимается 8°C);

$\Delta T_d$  – подогрев хладагента в обмотках статора электродвигателя, °С (принимается 10°C) и температуры на входе в компрессор  $T_{\text{вх}}, ^0\text{C}$  (5).

$$T_{\text{вх}} = T_{\text{кип}} + \Delta T_{\text{пп}}, \quad (5)$$

где  $T_{\text{кип}}$  – температура насыщения хладагента в испарителе, °С;

$\Delta T_{\text{пп}}$  – общий перегрев хладагента, °С.

### 3.3 Расчет давления хладагента на входе в компрессор $P_1$ ; кг/см<sup>2</sup> [12].

Анализ «Ln(P)-h» диаграммы показывает, что давление в испарителе и на входе в компрессор равны;  $P_{\text{исп.}} = P_1$ , кг/см<sup>2</sup> [9].

### 3.4 Подбор давления хладагента на выходе из компрессора $P_2$ , кг/см<sup>2</sup> [12,13].

Определяющим параметром является температура конденсации фреона  $T_{\text{конд}}, ^0\text{C}$  (температуру конденсации определяют по манометру, установленному на нагнетательной стороне холодильной установки, манометр показывает давление конденсации и соответствующую ему температуру). Давление и температура конденсации зависят от расхода и температуры воды или воздуха, поступающих на конденсатор. В рассматриваемой холодильной установке применяется естественное воздушное охлаждение конденсатора.

Теплообмен между конденсирующимся хладагентом и окружающей средой происходит при конечной разности температур (4...6°C), при этом начальная разность температур устанавливается в диапазоне 10...15°C. Температура окружающей среды изменяется в процессе теплообмена (воздух вблизи конденсатора нагревается на 6...8°C). Соответственно температура конденсации выбирается из расчета 42-55°C.

Корректность выбора давления подтверждается разностью давлений нагнетания и всасывания  $\Delta P_{2-1}$ , кг/см<sup>2</sup> согласно ГОСТ 6492-86 «Компрессоры поршневые одноступенчатые холодопроизводительностью свыше 3,5 кВт», о чем будет сигнализировать подсветка соответствующей ячейки в индикаторном режиме на пользовательском интерфейсе (рисунок 6) и детально (с указанием конкретных значений этой разности привязанной к соответствующему давлению на выходе из компрессора) на интерфейсе настроек (рисунок 7).

### 3.5 Расчет температуры выхода хладагента из конденсатора $T_2, ^0\text{C}$ [10].

Исходя из закономерностей политропного процесса производится расчет температуры выхода хладагента из конденсатора (6).



$$T_2 = T_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{m-1}{m}}, \quad (6)$$

где  $T_1$  – температура хладагента на входе в компрессор, °C (K);  
 $P_2$  – давление хладагента на выходе из компрессора, кг/см<sup>2</sup>;  
 $P_1$  – давление хладагента на входе в компрессор (в испарителе), кг/см<sup>2</sup>;  
 $m$  – показатель политропы.

3.6 Подбор показателя политропы (величины, характеризующей связь между параметрами газа в политропном процессе и зависящей от степени сжатия (расширения), температуры, теплоемкости) [12,14].

Для фреонов в зависимости от степени изменения параметров на диаграммах цикла в первом приближении устанавливается в диапазоне от 1,05 до 1,15 (применение значений близким к единице или менее не рекомендуется).

Во втором приближении используя онлайн расчет от компании «tlk-energy» (провайдер по цифровой инженерии технологических и энергетических систем, Германия), внося значения температуры конденсации в конденсаторе, температуры кипения в испарителе конкретного вида хладагента, подогрева хладагента и эффективности компрессора (значение которого устанавливаем равным 0,75) по отображаемому значению температуры выхода хладагента из компрессора уточняем показатель политропы таким образом, чтобы разность между расчетной температурой выхода и отображаемой в данной точке цикла не превышала значения 3°С в применяемом диапазоне  $T_1$ ,  $P_1$ ,  $P_2$  (рисунок 5).

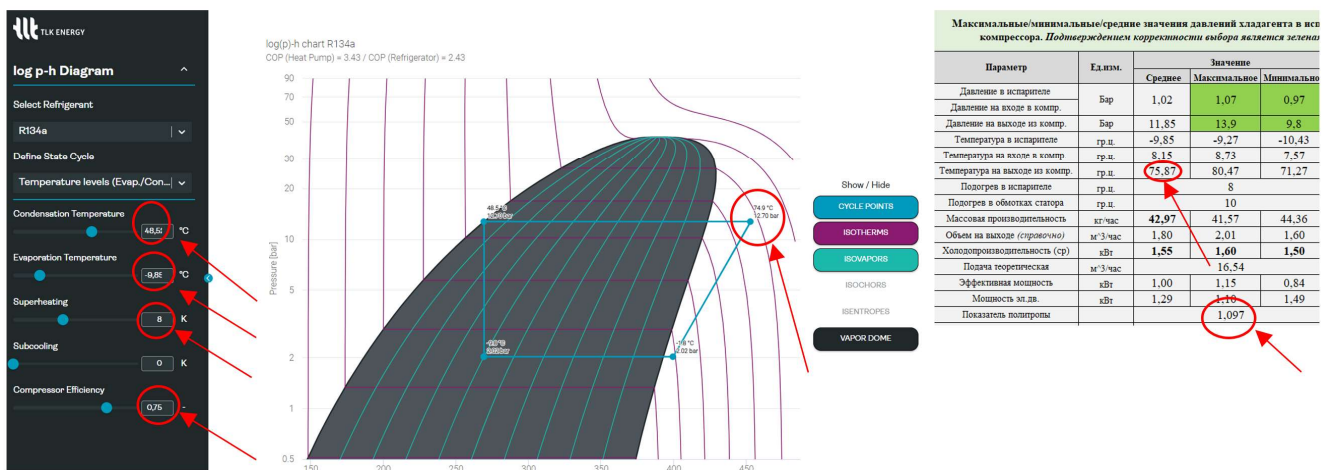


Рисунок 5 – Подбор и уточнение показателя политропы по температуре выхода из компрессора для «R134»

4 этап. Расчет основных (определяющих) показателей компрессора [9,10,12].

4.1 Расчет коэффициента объемного коэффициента компрессора.

Используя эмпирическую зависимость производится расчет объемного коэффициента компрессора (7) [10].

$$\lambda_v = 1 - C \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{m}} - 1 \right], \quad (7)$$

где  $C$  – коэффициент вредного пространства компрессора (принимается равным 0,03);  
 $P_2$  – давление хладагента на выходе из компрессора, кг/см<sup>2</sup>;  
 $P_1$  – давление хладагента на входе в компрессор (в испарителе), кг/см<sup>2</sup>;  
 $m$  – показатель политропы

и коэффициент подачи (8).

$$\lambda = \lambda_v \left( 1,01 - 0,02 \left( \frac{P_2}{P_1} \right) \right), \quad (8)$$

4.2 Расчет фактической подачи компрессора  $V_1\phi$ ; м³/час (9) [9].

$$V_1\phi = \lambda v_{1T} \quad (9)$$

где  $V_{1т}$  – теоретическая подача компрессора, м<sup>3</sup>/час;  
 $\lambda$  – коэффициент подачи.

#### 4.3 Расчет массовой производительности, Q; кг/ч [9].

Используя уравнение Менделеева-Клайперона производится расчет массовой производительности хладагента по фактической подаче (10).

$$Q = \frac{P_1 V_{1ф}}{R' T_1}, \quad (10)$$

где  $P_1$  – давление хладагента на входе в компрессор (в испарителе), кг/см<sup>2</sup>;  
 $V_{1ф}$  – фактическая подача компрессора, м<sup>3</sup>/час;  
 $R'$  – газовая постоянная хладагента Дж/(кг К);  
 $T_1$  – температура хладагента на входе в компрессор, °С (К).

4.4 Используя диаграммы состояния хладагентов по давлению и температуре на входе и выходе из испарителя определяется энтальпия в соответствующих точках цикла  $h$ ; кДж/кг.

#### 4.5 Расчет холодопроизводительности компрессора $q$ ; кВт (11) [12].

$$q = \lambda \rho_1 V_{1ф} (h_{\text{вых.исп}} - h_{\text{вх.исп}}), \quad (11)$$

где  $\lambda$  – коэффициент подачи;  
 $\rho_1$  – плотность хладагента (кг/м<sup>3</sup>);  
 $V_{1ф}$  – фактическая подача компрессора, м<sup>3</sup>/час;  
 $h_{\text{вых.исп}}$  – энтальпия хладагента на выходе из испарителя, кДж/кг;  
 $h_{\text{вх.исп}}$  – энтальпия хладагента на входе в испаритель, кДж/кг;

Также по величине работы политропного сжатия (12), теоретической мощности компрессора (13), эффективной мощности компрессора (14) программа **дополнительно** производит расчет мощности электродвигателя ( $N$ ; кВт) с учетом коэффициента запаса мощности в диапазоне 1,1...1,3 (15).

$$A_{\pi} = -\frac{m}{m-1} P_1 v_{1т} \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right]; \text{кДж} \quad (12)$$

где  $m$  – показатель политропы;  
 $P_1$  – давление хладагента на входе в компрессор (в испарителе), кг/см<sup>2</sup>;  
 $P_2$  – давление хладагента на выходе из компрессора, кг/см<sup>2</sup>;  
 $V_{1т}$  – теоретическая подача компрессора, м<sup>3</sup>/час;

$$N_{\pi} = \frac{A_{\pi}}{3600} Q; \text{кВт} \quad (13)$$

где  $A_{\pi}$  – работа политропного сжатия компрессора, кДж;  
 $Q$  – массовая производительность компрессора, кг/час.

$$N_e = \frac{N_{\pi}}{\eta_m}; \text{кВт}, \quad (14)$$

где  $N_{\pi}$  – теоретическая мощность компрессора, кВт;  
 $\eta_m$  – механический КПД компрессора (принимается равным 0,95).

$$N_3 = K_3 N_e, \quad (15)$$

где  $K_3$  – коэффициент запаса мощности (принимается равным 1,3).

### Структура интерфейса

Программа расчета включает в себя 3 листа Excel с табличными данными, графиками, логическими операторами, математическими функциями и формулами:

1 лист – пользовательский интерфейс, предназначен для внесения размеров цилиндро-поршневой группы, температуры в охлаждаемой камере и выбора вида хладагента., а также визуализации значений и характера изменения основных параметров (рисунок 6).

2 лист – интерфейс настроек, предназначен для визуализации конкретных значений отклонений параметров по соответствующей подсветке ячейки, настройки (изменения) значений стандартных параметров (подогрев хладагента, температурный напор, механический и изотермический КПД, коэффициент вредного пространства компрессора, коэффициент запаса мощности привода и т.д.), а также выполнения основных расчетов (рисунок 7).

3 лист – программный интерфейс одержит табличные данные, графики. Предназначен для интерполяции и выполнения основных расчетов (рисунок 8).

Расчет построен на использовании формул, логических операторов «Если», «И», «ИЛИ», условного форматирования ячеек, математических функций и т.д.

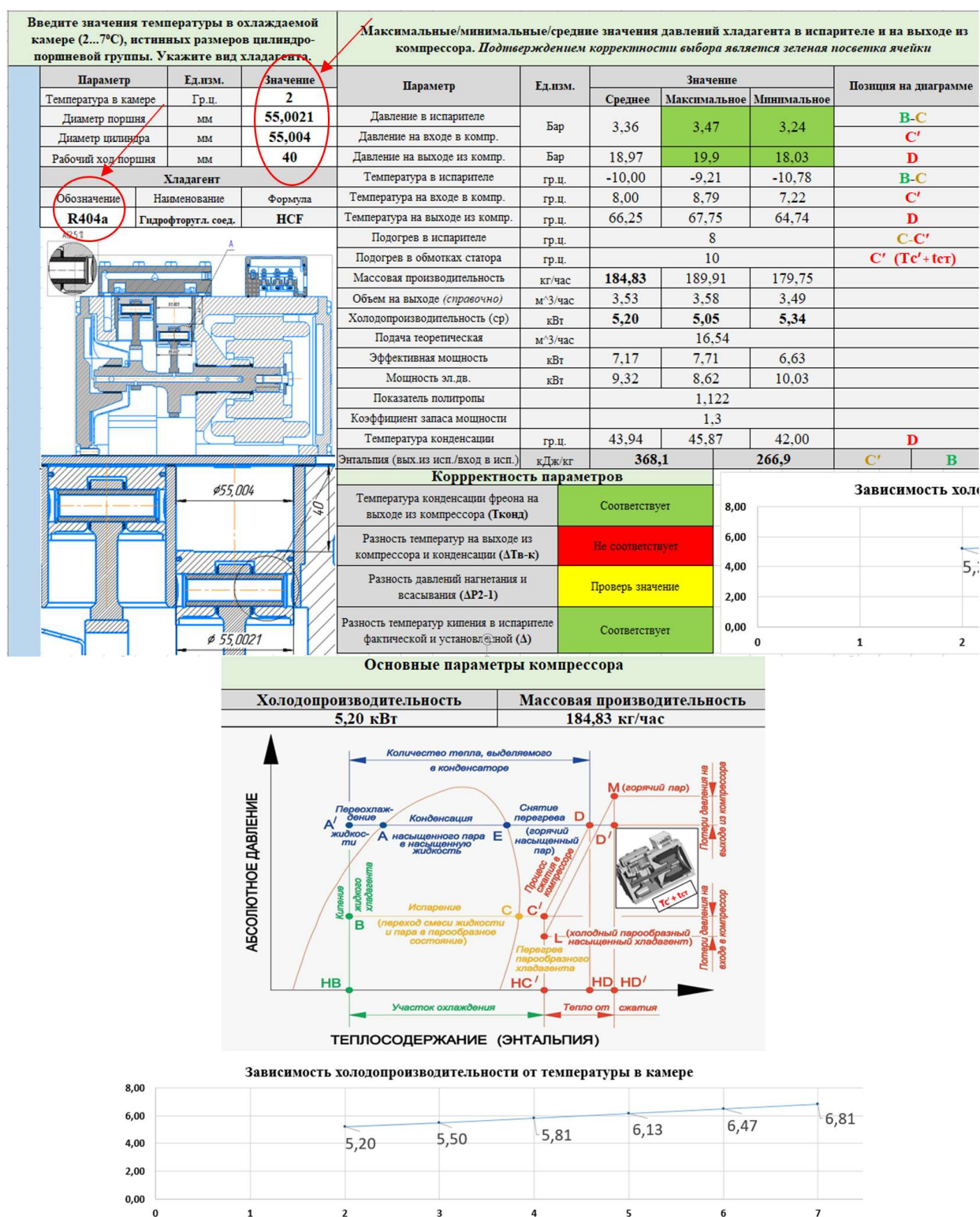


Рисунок 6 – Пользовательский интерфейс

## Порядок работы с пользовательским интерфейсом (рисунок 6)

1. Ввести значения диаметров цилиндра и поршня, рабочего хода поршня;
2. Выбрать значения температуры в охлаждаемой камере (от 2 до 7°C), тем самым имитируя работу терморегулирующего вентиля (рисунок 9).
3. Выбрать тип хладагента (рисунок 10).
4. Проверить корректность (оптимальность) параметров в соответствии с ГОСТ, тепловыми расчетами. Желтая подсветка табло («Проверь значение») – допустимые значения, красная подсветка («Не соответствует») – недопустимые значения, зеленая («Соответствует») – нормальные значения. При наличии желтой и (или) красной подсветки необходимо на



интерфейсе настроек (рисунок 7) произвести анализ конкретных значений в соответствующем диапазоне давлений хладагента в испарителе и на выходе из компрессора при заданной температуре в камере и типе хладагента

5. Произвести анализ значений холодопроизводительности по выбранному хладагенту и значениям размеров цилиндро-поршневой группы (график зависимости холодопроизводительности компрессора от температуры в камере на рисунке 6).

### Заключение

Таким образом, оператор на основании внесенных значений размеров цилиндро-поршневой группы, выбирая конкретный вид хладагента и значение температуры в охлаждаемой камере (от 2 до 7 °С) моделирует допустимый диапазон основных параметров компрессора (давление хладагента на входе, выходе, объемная и массовая производительность, холодопроизводительность, мощность приводного двигателя), а также характер их изменения, что позволяет спрогнозировать взаимозаменяемость и влияние отклонений размеров на работу холодильной установки еще на этапе изготовления корпуса компрессора.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Печерских, К. В. Поршневые компрессоры GEA предлагают новые возможности для российского рынка / К. В. Печерских // Холодильная техника. – 2017. – № 5. – С. 12-15. – EDN ZRRBVX.
2. Перспективы повышения производительности поршневых компрессоров / С. С. Бусаров, А. В. Недовенчаный, К. А. Бакулин, Н. Г. Сеницин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 11. – С. 579-580. – DOI 10.24412/2071-6168-2023-11-579-580. – EDN USWOBB.
3. Никифоров, А. Г. Вопросы повышения эффективности охлаждения поршневых компрессоров / А. Г. Никифоров // Компрессорная техника и пневматика. – 2023. – № 4. – С. 29-31. – EDN SMDLDC.
4. Условия работы клапанов поршневых компрессоров / С. С. Бусаров, А. В. Недовенчаный, И. С. Бусаров, Р. Э. Кобыльский // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 2. – С. 486-489. – DOI 10.24412/2071-6168-2024-2-486-489. – EDN BKGHVP.
5. Официальный сайт научно-образовательного центра «Академия Крио Фрост» [Электронный ресурс] – режим доступа: <https://kriofrost.academy/ob-akademii/>.
6. Официальный сайт компании «ТРЕЙД ГРУПП» [Электронный ресурс] – режим доступа: <https://www.holod-tk.ru/company/>.
7. Официальный сайт АО «ЦИФРА» (г. Санкт-Петербург) Компьютерное моделирование физических процессов как ключевой элемент реверс-инжиниринга в машиностроении [Электронный ресурс] – режим доступа: <https://multiphysics.ru/stati/blog/>.
8. ГОСТ ИСО Р 17584 -2015. Свойства хладагентов [Текст]. – Введ. 2016-01-01 – М.: Стандартинформ, 2015. – 67 с.: ил.; 73 с.
9. Антимонов С.В. Расчет поршневого компрессора: методические указания для практических работ / С.В. Антимонов, С.П. Василевская – Оренбургский гос. ун-т», Оренбург: ОГУ, 2021. – 28 с.
10. Довгялло А.И. Компрессорное оборудование: методические указания для практических работ (сборник задач)/ А.И. Довгялло. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2016. – 24 с.
11. Официальный сайт «Файловый архив для студентов» [Электронный ресурс] – режим доступа: <https://studfile.net/preview/7313628/page:36/>.
12. Татаренко Ю.В. Тепловые расчеты циклов холодильных машин: Учебно-методическое пособие / Ю.В. Татаренко – СПб.: Университет ИТМО, 2018. – 62 с.
13. ГОСТ 6492-86. Компрессоры поршневые одноступенчатые холодопроизводительностью свыше 3,5 КВт [Текст]. – Введ. 01.01.88 – М.: Издательство стандартов, 1992. – 8 с.: ил.; 6 с.
14. Официальный сайт компании «tlk-energy» [Электронный ресурс] – режим доступа: <https://tlk-energy.de/en/>.

**Андреев Андрей Владимирович**  
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь  
Доцент кафедры «Ядерных энергетических установок»  
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, д.33  
E-mail: [avandreev@mail.sevsu.ru](mailto:avandreev@mail.sevsu.ru)

**Стреляная Юлия Олеговна**  
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Цифровое проектирование»  
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, д.33  
E-mail: [yostrelyanaya@mail.sevsu.ru](mailto:yostrelyanaya@mail.sevsu.ru)

A.V. ANDREEV, YU.O. STRELYANAYA

## MODELING OF PROCESSES IN REVERSE ENGINEERING USING THE EXAMPLE OF A MARINE REFRIGERATION UNIT

**Abstract.** Reverse engineering has become an effective tool for import substitution in the domestic industry. This technology allows you not only to copy ready-made solutions, but also to improve them, adapt them to specific tasks and industries.

*Reverse engineering is a strategic process in which designers, together with scientists and technologists, study the node that includes the part, develop a model, simulate the process under different loads and external factors. Unfortunately, it is not always possible to access the node (unit) that includes the part, which means to simulate the operation of the part and how errors in its manufacture will affect the basic parameters of the node (unit) as a whole.*

*In this case, there is a high probability of rejection of the part, reduction of its service life, deterioration of the characteristics of the node (unit), while the reverse engineering specialist most often does not have the necessary theoretical and practical skills in a particular area.*

*In the described technical solution, a simple and effective way is proposed (using the Exel editor) to simulate the main parameters of a ships refrigeration unit (provision chamber), as well as the nature of their changes depending on the magnitude of errors in the size of the cylinder-piston group during reverse engineering of a semi-hermetic single-stage double-acting reciprocating compressor running on freon, with minimal information only about what products are provided for storage in the provision chamber.*

**Keywords:** Pressure, evaporator, condenser, compressor, polytropic process, temperature, thermodynamic cycle, refrigerant, cylinder-piston group.

## BIBLIOGRAPHY

1. Pecherskikh V. V. GEA reciprocating compressors offer new opportunities for the Russian market V. Pecherskikh // cold engineering. - 2017. – No. 5. – pp. 12-15. – EDN ZRRBVX.
2. Prospects for increasing the productivity of reciprocating compressors / S. S. Busarov, A.V. Dissatisfied, K. A. Bakulin, N. G. Sinitsyn // Izvestiya Tula State University. Technical sciences. - 2023. – No. 11. – pp. 579-580. – DOI 10.24412/2071-6168-2023-11-579-580. – EDN USWOBB.
3. Nikiforov, A. G. Issues of improving the cooling efficiency of reciprocating compressors / A. G. Nikiforov / Compressor equipment and pneumatics. – 2023. – No. 4. – pp. 29-31. – EDN SMDLDC.
4. Conditional operation of piston compressor valves / S. S. Busarov, A.V. Dissatisfied. S. Busarov, R. E. Kobylsky // Proceedings of Tula State University. Technical sciences. - 2024. – No. 2. – pp. 486-489. – DOI 10.24412/2071-6168-2024-2-486-487. – EDN BKGHP.
5. The official website of the scientific and educational center "Krio Frost Academy" [Electronic resource] - achievement mode: <https://kriofrost.no.academy/ob-akademii/>.
6. The official website of the TRADE GROUP company [Electronic resource] - access mode: <https://www.holod-tk.ru/company/>.
7. The official website of JSC "DIGITAL" (St. Petersburg) Computer modeling of physical processes as a key element of reverse engineering in mechanical engineering [Electronic resource] - achievement mode: <https://multiphysics.ru/stati/blog/>.
8. GOST ISO R 17584-2015. Their refrigerants [Text]. - Introduction. 2016-01-01-Moscow: Standartinform, 2015. – 67 P.: ill.; 73 P.
9. Antimonov S.V. Calculation of a reciprocating compressor: methodological guidelines for practical work / S.V. Antimonov, S.P. Vasilevskaya-Orenburg State University", Orenburg: OSU, 2021. – 28 p.
10. Dovgyallo A.I. Compressor support: methodological guidelines for practical work (collection of tasks)/ A.I. Dovgyallo. – Samara: Publishing House of Samara University, 2016. – 24 P.
11. The official website of the "File archive for students" [Electronic resource] - access mode: <https://studfile.net/preview/7313628/page:36>
12. Tatarenko Yu.V. Thermal calculations of cycles of cold machines: An educational and methodical manual / SE. Tatarenko-St. Petersburg: ITMO University, 2018. – 62 P.
13. GOST 6492-86. Reciprocating single-stage compressor refrigerators with a capacity of over 3.5 kW [Text]. - Introduction. 01.01.88-Moscow: Publishing House of Standards, 1992. – 8 P.: ill.; 6 P.
14. The official website of the tlk-energy company [Electronic resource] - access mode: <https://tlk-energy.de/en>.

### Andreev Andrey Vladimirovich

FSAOU HE «Sevastopol State University», Sevastopol  
Associate Professor Department of «Nuclear power plants»  
299053, Sevastopol, Universitetskaya str., h.33  
E-mail: [avandreev@mail.sevsu.ru](mailto:avandreev@mail.sevsu.ru)

### Strelyanaya Yulia Olegovna

FSAOU HE «Sevastopol State University», Sevastopol  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
Department of «Digital Design»  
299053, Sevastopol, Universitetskaya str., h.33  
E-mail: [yostrelyanaya@mail.sevsu.ru](mailto:yostrelyanaya@mail.sevsu.ru)

© А.В. Андреев, Ю.О. Стреляная, 2024

Я.Н. ГАЙНУЛЛИНА, П.К. СОПИН, М.И. КАЛИНИН

## К ВОПРОСУ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ БИОИНЕРТНЫХ ПОЛИМЕРОВ В ГЛУБОКОВОДНЫХ АППАРАТАХ ЖИДКОСТНОГО ДЫХАНИЯ

**Аннотация.** Одним из основных факторов, влияющих на безотказную работу глубоководных систем жидкостного дыхания является повреждаемость биоинертных имплантируемых полимерных материалов, поскольку коррозионно стойкие нержавеющие стали, сплавы, ситаллы и стеклокерамические изделия, являются заведомо более прочными, долговечными и надёжными в исследуемых условиях гипербарических экспериментов. В статье рассмотрены особенности поведения новых и специально созданных полимерных материалов имплантируемых в организм биообъектов при выполнении глубоководных исследований. Впервые изучено поведение новых материалов под действием морской воды с высоким содержанием сероводорода в Чёрном море на глубине более 1000 м.

**Ключевые слова:** гипербария, биоинертные полимеры, глубоководные аппараты, жидкостное дыхание, долговечность.

### Введение

Определенный интерес представляет изучение эксплуатационных характеристик новых биоинертных полимеров, встречающихся в имплантируемых изделиях при проведении глубоководных исследований процессов жидкостного дыхания биологических объектов. К таким материалам относятся следующие полимеры: пелетан, флубон, пренал, хирулен, полисар, полиэфирэфиркетон, поливак, триметиленкарбонат, поликапролактон и др. Конкретно в наших экспериментах, была задействована система, оснащенная датчиками «Stellar telemetry receiver» в комплекте со специальным приёмным устройством (антенной) рисунок 1.



*Рисунок 1 – Глубоководные имплантируемые датчики фирмы «Stellar telemetry receiver» в комплекте со специальным приёмным устройством (антенной)*

### Основная часть

В глубоководных экспериментах с биообъектами, целью которых было изучение проблем и особенностей режимов жидкостного дыхания, использовались такие жидкости как перфторан, перфторуглерод, перфтордекалин, карбогал, перфлуброн и др. Эти дыхательные жидкости и смеси обладают различными физико – механическими и химическими характеристиками – вязкостью, текучестью и, что особенно важно, различной степенью токсичности. Эти характеристики обосновали, во многом, применение в конструкциях дыхательных аппаратов различных деталей, узлов и их элементов выполненных из новых полимерных материалов, обладающих свойствами и характеристиками, отвечающими условиям эксплуатации в полной мере.

Исследование длительной прочности полимерных материалов в широком диапазоне давлений, напряжений и температур связано с большими экспериментальными трудностями, которые часто оказываются неопределёнными ввиду большой продолжительности опытов и

их высокой стоимостью. Поэтому предпринимались многочисленные попытки найти уравнения, которые позволили бы заменить длительные испытания при необходимой температуре, испытаниями меньшей продолжительности при повышенной температуре. Таких универсальных зависимостей до настоящего времени не существует [1].

Поведение различных ультраплотных полимеров весьма разнообразно, физические модели, которые лежат в основе построения теоретических зависимостей, являются идеализированным материалом. Для оценки длительной прочности полимерных материалов предложены различные эмпирические методы, однако надежные методы оценки эксплуатационных характеристик до настоящего времени отсутствуют.

Большинство отмеченных температурно – временных зависимостей длительной прочности основано на уравнении Аррениуса для скоростей химических реакций. Позже был предложен метод экстраполяции [2], при реализации которого необходимо проведение испытаний материалов не только при эксплуатационной, но и при более высокой температуре полимеризации с целью получения информации о процессах, определяющих термопрочность и износостойкость материалов при прогнозируемом эксплуатационном сроке службы.

Особо следует остановиться на методах экстраполирования и пересчетов с уравнений высоких температур на рабочие, в основе которых лежит предположение о подобии физических, термоактивационных и других процессов, протекающих в материалах в условиях естественного нагружения и при высоких температурах полимеризации.

Важно следить, чтобы температурный интервал, в котором предполагается вести расчёты, определялся единым характером структурных изменений в материале при длительном температурном воздействии. В этом случае можно допускать геометрические подобия диаграмм длительной прочности в том же температурном интервале [3,4]. Указанный метод может быть применен к полимерным материалам, обладающим сверхвысоким молекулярным весом типа WIAM(полиэтилен ультравысокой молекулярной плотности с перекрёстными связями).

Целью работы является исследование температурно – временной зависимости длительной прочности и сравнение различных методов её оценки для полимеров типа «хирулен». Кроме того, рассмотрены вопросы усталостного повреждения аналогичных имплантируемых полимеров. Чтобы ввести две стадии усталостного повреждения хирулена сверхвысокой молекулярной плотности (СВМП), предпринята попытка описать процесс накопления повреждений в материале с помощью группы функций.

Обычно опыты на ползучесть ультраплотных полимеров вплоть до разрушения проводятся на четырёхдиапазонных установках, позволяющих исследовать ползучесть и долговечность при постоянном напряжении по методике, изложенной в работе [5].

Необходимо отметить, что все экстраполярные методы, основанные на температурном моделировании времени проведения эксперимента, носят формальный характер.

Согласно данным [1], температурную зависимость для скорости ползучести хирулена СВМП можно представить в виде:

$$V \sim \exp\left(-\frac{V(\sigma)}{RT}\right) c, \quad (1)$$

где  $V$  – скорость ползучести;  
 $c$  – некоторая константа.

Результаты экспериментов показывают, что произведение скорости ползучести  $V$  на время до разрушения  $\tau^*$ , для исследуемых полимерных материалов приблизительно постоянно. Используя этот факт, приходим к параметрической зависимости Ларсона – Миллера [6].

$$F_1 = T(c + \lg \tau^*), \quad (2)$$

где  $T$  – температура;  
 $c$  – физический параметр хирулена.

Метод Ларсона – Миллера позволяет совместить данные различных изотермических испытаний на одну обобщенную кривую в координатах  $F_1(\sigma)$ - $\sigma$ . Наилучшее совмещение достигается при  $c = 16$  (рисунок 2), расчётные значения приведены ниже. При напряжениях  $\sigma = 750 \div 900$  Н/м<sup>2</sup> наблюдаются отклонения от линейной параметрической зависимости. Несколько лучшие результаты получены в случае применения параметрического уравнения Менсона – Хаферда [3]:

$$F_2(\sigma) = \frac{T - T_\alpha}{\lg x - \lg t_\alpha}, \quad (3)$$



где  $T$  и  $t_\alpha$  – параметры материала для рассматриваемого случая,  $T_a = 400$ ,  $\lg t_\alpha = -3$ . Однако и эта зависимость дает отклонение при напряжении  $750 \div 900 \text{ Н/м}^2$ . Применение более сложной зависимости Орра, Шерби и Дорна [4]:

$$F_3 = \int_0^{\tau_x} \exp\left(\frac{u_0}{RT}\right) dt, \quad (4)$$

на результаты вычислений существенно не повлияло.

Можно предположить, что отклонение от линейной зависимости в первом и втором случаях происходит вследствие изменения характера повреждения конструкции [7].

В работах [8] предложен уточнённый метод прогнозирования, основанный на гипотезе о физическом подобии характера структурных изменений в материале в строго ограниченных интервалах и наличии подобия между диаграммами длительной прочности в тех же температурных интервалах.

Подобие диаграмм длительной прочности рассматривается по двум координатам  $\sigma$  и  $\tau$ . При этом сопоставимые с точки зрения эквивалентной повреждаемости значения напряжений, вызывающие разрушения за разное время при различных условиях, располагаются в наклонных сечениях, которые могут быть приведены к одному полюсу.

Положение каждого луча, проведенного произвольно из полюса, определяется уравнением:

$$k = \operatorname{ctg} \alpha = \frac{\lg \tau - l_0}{\lg \sigma - l_0}, \quad (5)$$

где  $\sigma_0$  и  $\tau_0$  – координаты полюса;  $\sigma$  – напряжение, вызывающие разрушение при данных условиях за время  $\tau$ ;  $1/k$  – тангенс угла наклона лучей к оси абсцисс [9].

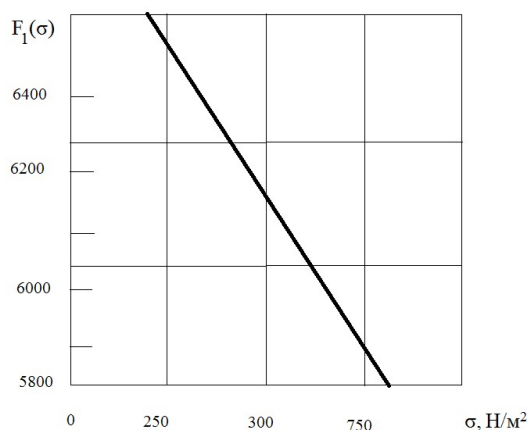


Рисунок 2 – Зависимость параметра Ларсона – Миллера  $F_1$  от напряжения  $\sigma$

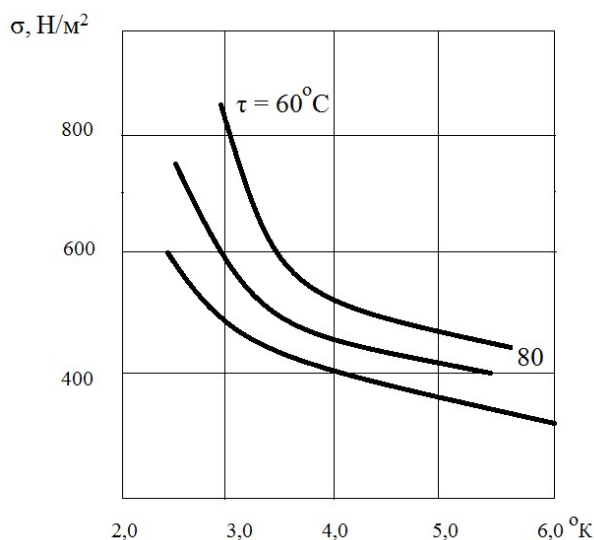


Рисунок 3 – Диаграммы длительной прочности ультраплотного полиэтилена в координатах  $\sigma - k$

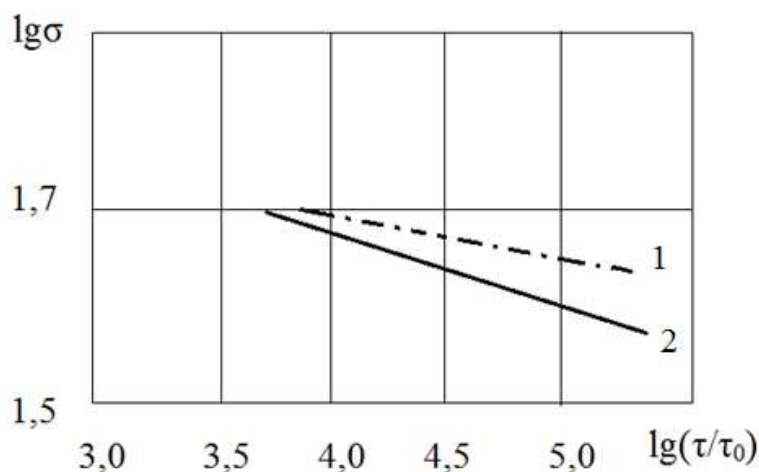
С помощью параметра  $k$  диаграммы длительной прочности спецполимеров можно перестроить так, что они будут геометрически подобны. На рисунке 3 показаны такие диаграммы для трёх уровней температур. Величину параметра для каждого напряжения определяем по формуле (5). Как видно, лишь нижние ветви кривых подобны (от значений  $\lg \tau = 3.6$ ). В этом же диапазоне у хирулена наблюдалось изменение характера повреждения [10]. На рисунке 3 показаны теоретические кривые, полученные расчётами по обобщенной диаграмме длительной прочности, построенной по методике, описанной в работе [9]. Там же нанесены экспериментальные данные при  $36^\circ\text{C}$ . Как видно, совпадение эксперимента и расчётов вполне удовлетворительно.

Рассмотрим обобщённый параметрический метод [8], основанный на соотношении

$$\sigma = f\left(\lg \tau - \frac{b(\sigma)}{T}\right); \quad (6)$$

$$b(\sigma) = \frac{Q(\sigma) \lg e}{R} = \alpha + \beta \sigma, \quad (7)$$

где  $T$  – температура,  $^\circ\text{K}$ ;  
 $\alpha$  и  $\beta$  – постоянные величины.



**Рисунок 4 – Диаграмма длительной прочности ультраплотного полиэтилена:**

1 – теоретическая кривая, построенная по методу Ковпака, на основании расчетных данных;  
2 – теоретическая кривая, построенная по обобщенному параметрическому методу, на основании расчётных данных

В этом методе в качестве основного параметра использована величина  $b(\sigma)$ , пропорциональная условной энергии активации повреждения,  $Q(\sigma)$  определяющей наклон линии  $\sigma = \text{const}$  в заданных координатах  $\lg \tau - \frac{1}{T}$ .

Перенос экспериментальных значений  $\tau$  с  $T_{i+1}$  по зависимости  $b = b(\alpha)$  выполняется по уравнению

$$\lg \tau_{(T_1)} = \lg \tau_{(T_{i+1})} + b(\sigma) \left( \frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_{i+1}} \right). \quad (8)$$

Следует отметить, что для ультраплотного высокомолекулярного полиэтилена теоретическая кривая 1 (рисунок 4) построенная по методике, приведенной в работе [9], лучше совпадает с результатами экспериментов в области высоких долговечностей, чем кривая 2, построенная по обобщенному параметрическому методу.

Кроме того, проводилось редуцирование кривых долговечности и приведение их по методу обобщенных координат [5]. При этом учитывается, что метод обобщенных координат лишь формально применим к изучению прочностных свойств ультраплотных полимеров, поскольку процесс разрушения высокопрочных полимеров лишь косвенно связан с релаксационными явлениями в их структуре. Процессы деформации и разрушения высокопрочных полимеров взаимосвязаны, но их молекулярные механизмы различны [9]. Далее проводили регрессионный анализ и определяли уравнения регрессии:

$$\lg \tau = \alpha + d (\lg \sigma_1 - \lg \vec{\sigma}), \quad (9)$$

где

$$\lg \vec{\sigma} = \frac{\sum n_i \lg \sigma_i}{N},$$

и далее –  $n_i$  – количество образцов для данного значения  $\alpha_1$  на рассматриваемом участке:  $\alpha$  и  $d$  – коэффициенты уравнения.

Для экспериментальных кривых строились доверительные интервалы при уровне доверительной вероятности 0,99. Величину смещения рассчитывали из условия наилучшего совмещения доверительных интервалов кривых долговечности.

На рисунке 5 показана совмещенная кривая, приведенная к температуре 36 °С, точками представлены экспериментальные данные. Значение  $\lg \sigma$  для температуры 80 и 70 °С соответственно составили 1,17 и 0,59. На кривой длительной прочности (рисунок 4) отчетливо заметны два участка в области квазихрупкого повреждения. В работе [9-11] отмечено, что при длительном действии нагрузки небольшой интенсивности на образцы СВМП микротрещины локализируются вблизи некоторого сечения, по которому происходит разрушение образца. Действительно, при кратковременных изотермических опытах с  $v_\varepsilon = \text{const}$  или  $v_\alpha = \text{const}$  деформация СВМП, соответствующая моменту разрушения, многократно возрастает. Для исследуемых случаев при повреждении в условиях ползучести, величина  $\varepsilon_p$  уменьшается (в зависимости от продолжительности опыта) до 5 – 25%. Это свидетельствует об «охрупчивании» материала в условиях длительной ползучести и правомерности введения в уравнение ползучести СВМП параметра «растрескивания».

Наличие микротрещин ослабляет поперечное сечение образца, уменьшая эффективную площадь, по которой распределяются растягивающие напряжения.

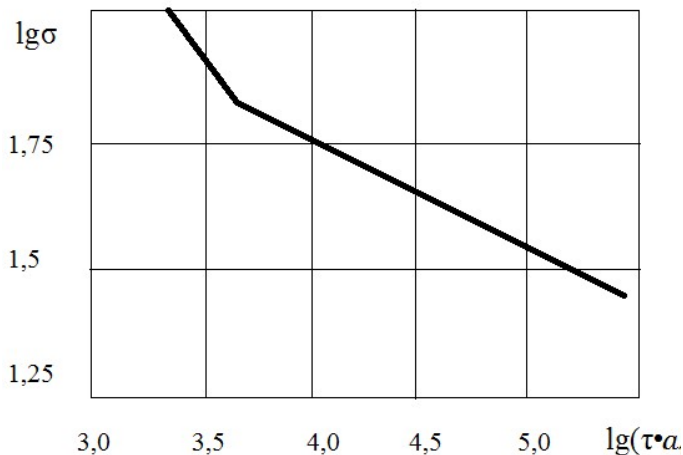


Рисунок 5 – Обобщенная кривая долговечности хирулена в координатах  $\lg \sigma - \lg(\tau \cdot \alpha)$

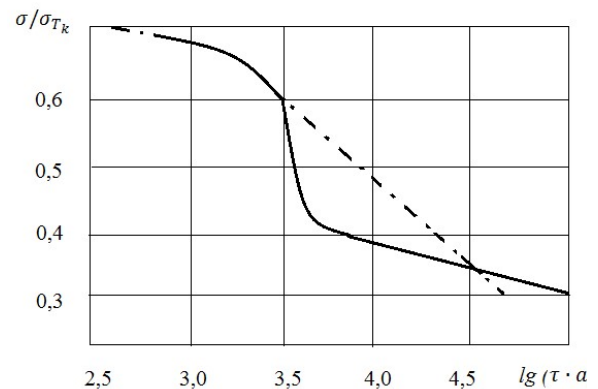


Рисунок 6 – Обобщенная кривая долговечности хирулена в координатах  $\sigma/\sigma_{\tau_k} - \lg(\tau \cdot \alpha)$

$$\sigma = \frac{P}{F(1-\omega)} = \frac{\sigma_0}{1-\omega}, \quad (10)$$

где  $\sigma_0$  – условное напряжение,

$\omega$  – степень уменьшения эффективной площади сечения вследствие растрескивания.

В простейшем случае скорость дефектообразования можно считать функцией напряжений:

$$\omega = \varphi(\sigma). \quad (11)$$

Разрешая (10) относительно  $\omega$  и дифференцируя, получаем

$$\omega = \sigma_0 / \sigma^2 \cdot d\sigma.$$

После подстановки этого выражения в (10), разделения переменных и интегрирования (учитывая, что при  $\tau = 0$ ,  $\sigma = \sigma_0$ , при  $\tau = \tau_x$ ,  $\omega = 1$ ) имеем:

$$\tau_x = \sigma_0 \int_{\sigma_0}^{\infty} \frac{1}{\sigma^2 \varphi(\sigma)} d\sigma. \quad (12)$$

В соответствии с данными экспериментов,  $\varphi(\sigma)$  можно считать степенной функцией:

$$\varphi(\sigma) = \sigma^k.$$

При использовании (12) получим:

$$\tau_x = \frac{1}{c \cdot (1+k) \cdot (\sigma_0)^k}. \quad (13)$$

Таким образом, долговечность на первом участке описывается уравнением (13) с  $K_1 = 3,34$ . Для второго участка повреждения  $K_2 = 4,95$ .

Представляет интерес совмещение кривых долговечности в координатах  $\sigma/\sigma_1 - \lg t$  (как и ранее  $\sigma_{\tau}$  – предел текучести при заданной температуре). Значения  $\lg a_{\tau}$  для рабочих температур соответственно составили 0,43 и 0,34.

На рисунке 6 штрихами изображена традиционная диаграмма длительной прочности, сплошной линией – совмещения кривая, полученная в данном случае. Участок a – b характерен для вязкого, b – c – смешанного, c – d – хрупкого повреждения. Однако, в работе [1] отмечалось, что для структурно неустойчивых материалов диаграмма длительной прочности может иметь более сложный характер.

Учитывая изложенное выше, можно рассмотреть особенности усталостного повреждения ультраплотного полиэтилена. Для двух стадий усталостного повреждения введем две меры повреждаемости. Одна из них –  $\omega_1$  характеризует меру накопления микроповреждений и «подготовку» образца к образованию усталостной трещины, вторая –  $\omega_2$  является мерой развития статистической усталости трещины ( $\omega_2 = 0$  при  $\omega_1 \leq 1$  обращается в единицу в момент полного разрушения).

Запишем

$$\begin{cases} \omega = \varphi_1(\sigma, \omega_1) \\ \omega_2 = 0 \text{ при } \omega_1 < 1; \\ \varphi_2(\sigma, \omega_1, \omega_2) \text{ при } \omega_1 \geq 1, \end{cases} \quad (14)$$

где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – функции, которые в дальнейшем подлежат конкретизации. Введем следующие допущения: 1) предположим, что развитие повреждений слабо зависит от меры их

накопления, если  $\varphi_1 > 1$ ; 2) согласно гипотезе об автомодельности, предположим, что при  $\sigma = \text{const}$  величины  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  не зависят от напряжений, а определяются соотношениями

$$\omega_{1\sigma} = \omega_{1\omega}(\tau/\tau_{\sigma}^{tp}); \quad (15)$$

$$\omega_{2\sigma} = \omega_{2\omega}[(\tau - \tau_{\sigma}^{tp})/(\tau_{\sigma}^x - \tau_{\sigma}^{tp})], \quad (16)$$

где  $\tau_{\sigma}^{tp}$  – время, необходимое для зарождения повреждения (инкубационный период) при данном значении  $\sigma$ ;  $\tau_{\sigma}^x$  – долговечность при заданном значении  $\sigma$ . В отличие от теории суммирования повреждений здесь предполагается, что гипотеза об автомодельности справедлива лишь на каждой стадии в отдельности.

Учитывая указанные предположения, приходим к следующим уравнениям:

$$\begin{cases} \omega_1 = \omega_{1\omega}(\tau/\tau_{\sigma}^{tp}(\sigma)); \\ \omega_2 = 0 \text{ при } \omega_1 < 1; \\ \omega_2 = [\tau^x(\sigma) - \tau^{tp}(\sigma)] \text{ при } \omega_1 \geq 1. \end{cases} \quad (17)$$

Проинтегрировав первое из уравнений в диапазоне от 0 до  $\tau_0$ , где  $\tau_0$  – время, необходимое для появлений деформации при сложном режиме нагружения, а второе от  $\tau_0$  до  $\tau_c^x$ , получим

$$\int_0^{\tau_0} \frac{1}{\tau^{tp}(\sigma)} dt = 1; \quad \int_{\tau_0}^{\tau_c^x} \frac{1}{\tau^x(\sigma) - \tau^{tp}(\sigma)} dt = 1. \quad (18)$$

Из первого условия найдем  $\tau_0$ , из второго –  $\tau_c^x$  (время до разрушения при сложном режиме нагружения). Действительно, при более высоких напряжениях инкубационный период занимает относительно меньшую часть общей долговечности, чем при низких напряжениях. Таким образом, в отличие от теории суммирования повреждений учитывается влияние истории нагружений «хирулена». Положив  $\tau^{tp} \rightarrow 0$ , приходим к теории суммирования повреждений с учётом истории нагружений.

Таким образом, изучена температурно – временная зависимость длительной прочности хирулена (полиэтилена сверхвысокой молекулярной плотности).

Показано, что применение параметрического уравнения Менсона – Хаферда и метода физического подобия Ковпака для обработки экспериментальных данных дают лучшие результаты в сравнении с другими зависимостями.

Для феноменологического описания двух стадий усталостного повреждения хирулена введены две меры повреждаемости, что позволяет в отличие от теории суммирования повреждений учитывать влияние истории нагружений.

### Заключение.

В результате выполненных исследовательских работ, целью которых было изучение механизмов повреждаемости биоинертных полимерных материалов на больших глубинах – стало очевидным наличие ряда факторов, влияющих на долговечность и работоспособность сверхвысокомолекулярных полиэтиленов (СВМП) типа «хирулен». Появилась возможность ранжирования вредных факторов и снижение их влияния на работоспособность полимерных компонентов узлов глубоководных аппаратов жидкостного дыхания. Учтены особенности влияния морской воды с высоким содержанием сероводорода, характерным для глубоководных участков акватории Чёрного моря. В целом, это дало возможность предотвратить или минимизировать влияние негативных факторов на долговечность полимерных материалов и значительно увеличить ресурс работы глубоководных аппаратов жидкостного дыхания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций – М.: Наука, 1966. – 752 с.
2. Larson F.R. A time – temperature relationship for rupture and creep stress / F.R. Larson, I.A. Miller – ASME.: Trans, 1952. – №5, p. 74.
3. Mansos S.S., A Linear time – temperature relation for extrapolation of creep and stress rupture data / S.S. Mansos, A.A. Haferd // NACAT. – Washington. – 1953. – № 2890.
4. Orr R.L. Correlation of rupture data for metals at elevated temperatures / R.L. Orr, O.D. Sherby, I.D. Dorn // Soc. for Metals. – Trans. Amer. – 1954. – № 46.
5. Бартенев Г.М. Прочность и разрушение высокоэластичных материалов / Г.М. Бартенев, Ю.С. Зуев – М.: Химия, 1964. – 388 с.
6. Работнов Ю.Н. Кратковременная ползучесть / Ю.Н. Работнов, С.Т. Милейко – М.: Наука, 1970. – 224 с.
7. Болотин В.В. Статистические методы в строительной механике – М.: Стройиздат, 1965. – 279 с.
8. Смирнов – Аляев Г.А. Сопrotивление материалов пластическим деформациям – М.: Мир, 1969. – 247 с.
9. Архангельский Б.А. Пластические массы. Справочное пособие – Л.: Судпромиздат, 1961. – 721 с.

10. Катаев В.М. Справочник по пластическим массам / В.М. Катаев, В.А. Попова, В.И. Сажина – М.: Химия, Том 1. – 1975. – 447 с.

11. Гайнуллина Я.Н. Оценка деформативности элементов глубоководных систем при сложном нагружении / Я.Н. Гайнуллина, М.И. Калинин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева. – 2023. – № 4(360) – С. 16 – 24.

**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

**Сопин Павел Константинович**  
ФГАОУ ВО «Севастопольский  
государственный университет»,  
Старший научный сотрудник  
лаборатории «Экспериментальные  
системы жизнеобеспечения  
биологических объектов»  
г. Севастополь, ул. Гоголя, д. 14  
тел. +7(8692) 417741  
pavel.sopin@gmail.com

**Калинин Михаил Иванович**  
ФГАОУ ВО «Севастопольский  
государственный университет»,  
кандидат технических наук,  
доцент, руководитель группы  
лаборатории  
«Экспериментальные системы  
жизнеобеспечения биологических  
объектов»  
г. Севастополь, ул. Гоголя, д. 14  
тел. +7(8692) 417741

Ya.N. GAYNULLINA, P.K. SOPIN, M.I. KALININ

## ON THE ISSUE OF DAMAGE TO BIOINERT POLYMERS IN DEEP-SEA LIQUID BREATHING APPARATUS

**Abstract.** One of the main factors affecting the trouble-free operation of deep-sea liquid respiration systems is the damage of bioinert implantable polymer materials, since corrosion-resistant stainless steels, alloys, sitals and glass-ceramic products are obviously more durable, durable and reliable in the studied conditions of hyperbaric experiments. The article considers the features of the behavior of new and specially created polymer materials implanted into the body of biological objects during deep-sea research. The behavior of new materials under the action of seawater with a high content of hydrogen sulfide in the Black Sea at a depth of more than 1000 m has been studied for the first time.

**Keywords:** hyperbaria, bioinert polymers, deep-sea vehicles, liquid respiration, durability.

### BIBLIOGRAPHY

1. Robotnov U.N. Polzychest elementov konstruytcy – М.: Nayka, 1966. – 752 s.
2. Larson F.R. A time – temperature relationship for rupture and creep stress / F.R. Larson, I.A. Miller – ASME.: Trans, 1952. – №5, p. 74.
3. Mansos S.S., A Linear time – temperature relation for extrapolation of creep and stress rupture data / S.S. Mansos, A.A. Haferd // NACAT. – Washington. – 1953. – № 2890.
4. Orr R.L. Correlation of rupture data for metals at elevated temperatures / R.L. Orr, O.D. Sherby, I.D. Dorn // Soc. for Metals. – Trans. Amer. – 1954. – № 46.
5. Bartenev G.M. Prochnost i razrushenie vicokoelastichnikh materialov / G.M Bartenev, U.S. Zhev– М.: Khimiya, 1964. – 388 s.
6. Rabotnov U.N. Kratkovremennaya polzychest / U.N. Rabotnov, S.T. Mileiko – М.: Nayka, 1970. – 224 s.
7. Bolotin V.V. Statisticheskie metody v stroitelnoy mekhanike – М.: Stroyizdat, 1965. – 279 s.
8. Smirnov – Alyaev G.A. Soprotivlenie materialov plasticheskim deformatsiyam – М.: Mir, 1969. – 247 s.
9. Arkhangel'skiy B.A. Plasticheskie massy. Spravochnoe posobie – L.: Sudpromizdat, 1961. – 721 s.
10. Kataev V.M. Spravochnik po plasticyskim massam / V.M. Kataev, V.A. Popova, V.I. Sazhina – М.: Khimiya, Tom 1. – 1975. – 447 s.
11. Gaynullina Ya.N. Otcenka deformativnosti elementov glybokovodnykh sistem pri slozhnom nagruzhenii / Ya.N. Gaynullina, M.I. Kalinin // Fyndamentaknie i prikladnie problemi tekhniki I tekhnologii – Орел: ОГУ им. И.С. Тергенева. – 2023. – № 4(360) – С. 16 – 24.

**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

**Sopin Pavel Konstantinovich**  
Sevastopol State University,  
Senior researcher of the laboratory  
"Experimental life support  
systems of biological objects"  
Sevastopol, Gogol str., 14  
tel. +7(8692) 417741  
pavel.sopin@gmail.com

**Kalinin Mikhail Ivanovich**  
Sevastopol State University,  
Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor, Head of the  
laboratory  
group "Experimental life support  
systems for biological objects"  
Sevastopol, Gogol str., 14 tel.  
+7(8692) 417741  
e-mail: kalinin sv@mail.ru

© Я.Н. Гайнуллина, П.К. Сопин, М.И. Калинин, 2024

З.А. ГОДЖАЕВ, С.Е. СЕНЬКЕВИЧ, И.С. МАЛАХОВ, С.Ю. УЮТОВ

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ ПОДРЕССОРИВАНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МОБИЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

**Аннотация.** В настоящей работе представлена и исследована адаптивная подвеска МЭС. Проведены исследования адаптивной подвески МЭС на предмет степени воздействия на почвенный фон (агрофон). Проведены прочностные расчеты методом конечных элементов. Рассчитана модель кронштейнов и стенки, где в качестве исходных данных использованы массово-габаритные и упругодемпфирующие свойства конструктивных элементов МЭС, на базе трактора тягового класса 3, полученные расчетно-экспериментальным путём и реальное опорное основание (агрофон) с известным микро- и макропрофилем и представлены результаты теоретических расчетов.

**Ключевые слова:** адаптивная система подрессоривания, мобильные энергетические средства, эффективность, система подрессоривания.

### Введение

В процессе обработки сельскохозяйственных полей, современными энергонасыщенными машинами с навесными или прицепными устройствами одним из ключевых аспектов является показатель давления на почву движителями МЭС. Существующие методы снижения давления, зачастую, требуют больших трудозатрат. Одним из достоинств разработанной АСП является существенное снижение давления на почву, вследствие чего, исключаются такие негативные последствия как: переуплотнение почвы, образование поверхностного пласта, мешающего просачиванию воды вглубь почвы, что способствует заболачиванию местности, снижение эффективности внесенных удобрений, снижение урожайности до 30% и т.д.

### Анализ

Существенным преимуществом адаптивной системы подрессоривания является снижение давления на почву на 21,5% за счет обеспечения оптимального диапазона жесткостей при преодолении полнокомплектным МЭС дорожных неровностей. На рисунке 1 представлена динамическая система движения  $\frac{1}{4}$  модели.

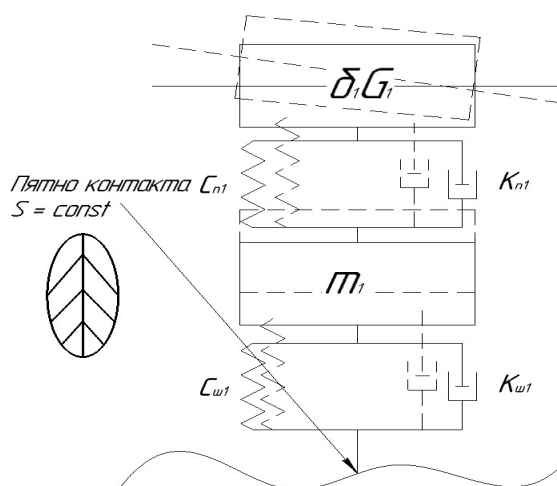


Рисунок 1 - Схема динамической системы  $\frac{1}{4}$  подвески МЭС

### Расчет

Для расчета эффекта снижения давления на почву, обратимся к ГОСТ Р 58656-2019. Сравнение давления на почву от базовой СП и разработанной представлено на рисунке 2.

Согласно приведенному госту, максимальное нормальное давление движителя на почву может быть найдено по следующей формуле [11]

$$q_{max}^k = \frac{K_2 G_K}{K_1 F_K}, \quad (1)$$

где  $K_2$  – 1,5 коэффициент продольной неравномерности распределения давления;  
 $G_K$  – статическая вертикальная нагрузка на опорное основание от единичного колесного движителя, кН;

$K_1$  – коэффициент, зависящий от наружного диаметра шины колеса;

$F_K$  – контурная площадь пятна контакта протектора шины, м<sup>2</sup>;

С целью определения, опираясь на математическую модель динамической нагруженности, рассмотрим приведенную к передней оси систему, в которой усилия со стороны шин в сторону подвески принимают вид:

$$F_{ш1} = C_{ш1}(Z_1 - q_1) + k_{ш1}(\dot{Z}_1 - \dot{q}_1) \quad (2)$$

$$F_{ш2} = C_{ш2}(Z_2 - q_2) + k_{ш2}(\dot{Z}_2 - \dot{q}_2), \quad (3)$$

где  $C_{ши}$  – коэффициент жесткости шины;

$k_{ши}$  – коэффициент демпфирования шины;

$Z_i$  – обобщенная координата перемещения оси i-го колеса борта МЭС;

$q_i$  – координата неровности микропрофиля опорного основания.

Тогда усилие со стороны подвески в сторону остова мобильного энергосредства примет следующий вид

$$F_{п1} = C_{п1}(Z_{м1} - Z_1) + k_{п1}(\dot{Z}_{м1} - \dot{Z}_1) \quad (4)$$

В таблице 1 указаны коэффициенты и их обозначения, уравнений (2) – (4).

Таблица 1 - Коэффициенты уравнений

Обозначение	Наименование	Величина в базовом варианте	Величина в варианте с активной системой
$C_{ш1}$	Коэфф. жесткости левой шины	475 кН/м	475 кН/м
$C_{ш2}$	Коэфф. жесткости правой шины	475 кН/м	475 кН/м
$C_{п1}$	Коэфф. жесткости передней подвески	920 кН/м	Ј кН/м
$k_{ш1}$	Коэфф демпфирования левой шины	$\frac{1760 \text{ Н} \cdot \text{с}}{\text{м}}$	$\frac{1760 \text{ Н} \cdot \text{с}}{\text{м}}$
$k_{ш2}$	Коэфф демпфирования правой шины	$\frac{1760 \text{ Н} \cdot \text{с}}{\text{м}}$	$\frac{1760 \text{ Н} \cdot \text{с}}{\text{м}}$
$k_{п1}$	Коэфф демпфирования системы подрессоривания переднего моста	$\frac{13000 \text{ Н} \cdot \text{с}}{\text{м}}$	$\frac{13000 \text{ Н} \cdot \text{с}}{\text{м}}$

Соотношение усилий со стороны подвески в сторону почвы можно представить в следующем виде

$$G_{Kj} = \frac{F_{п1}}{F_{пj}} = \frac{C_{п1}(Z_{м1} - Z_1) + k_{п1}(\dot{Z}_{м1} - \dot{Z}_1)}{C_{пj}(Z_{м1} - Z_1) + k_{п1}(\dot{Z}_{м1} - \dot{Z}_1)} \quad (5)$$

Поскольку в процентном соотношений  $F_{пj}$  на 15% меньше, чем  $F_{п1}$ , уравнение для нахождения максимального нормального давления движителя на почву

$$q_{max}^k = \frac{K_2 G_K \cdot 0,85}{K_1 F_K} \quad (6)$$



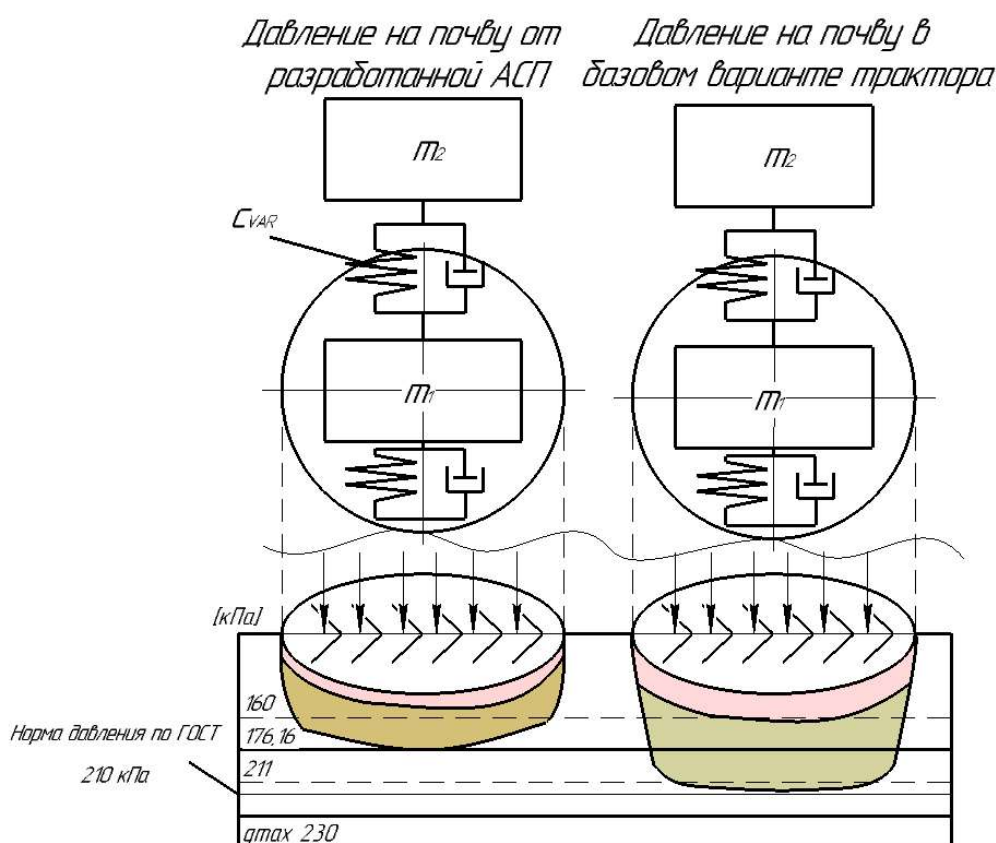


Рисунок 2 - Давление на почву от колёс МЭС

С целью расчета эффективности гашения колебаний адаптивной системы поддрессирования (АСП), методом конечных элементов в программно-аппаратном комплексе «NX» найдем действующие напряжения в конструкции лонжеронов переднего моста [1-10]. На рисунке 3 представлен общий вид системы поддрессирования переднего моста.

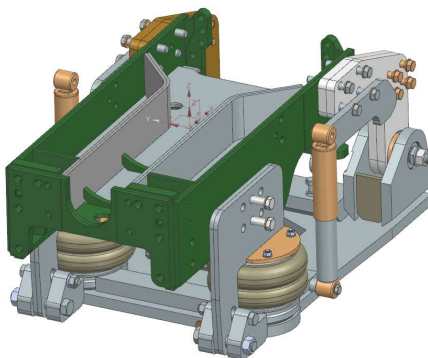


Рисунок 3 - Общий вид системы поддрессирования переднего моста с лонжеронами (без полурамы)

При постановке задачи следует определиться со схемой приложения сил и граничными условиями. Решая данную задачу, условимся рассмотреть вариант нагружения в котором нагрузка не переходит не переходит далее на полураму. В качестве величины приложенных усилий используем эксплуатационную массу трактора Агромаш 3ТК-180 с передней навеской. Проанализировав конструктивные особенности системы поддрессирования, можно выделить следующие аспекты, необходимые отразить в конечно-элементной модели, а именно: установка передних кронштейнов имеет свободный ход по оси Z, но не воспринимает вращения по оси Y, задние кронштейны ограничены в поступательном перемещении по оси Z, но, поскольку находятся на втулке, могут свободно вращаться вдоль оси Y, ограничиваясь жесткостью полурамы и лонжерона [12-18]. При предварительном анализе можно выделить



наиболее нагруженные места – верхняя стенка лонжерона нагружена растяжением. Общий вид разработанной конечно-элементной модели представлен на рисунке 4.

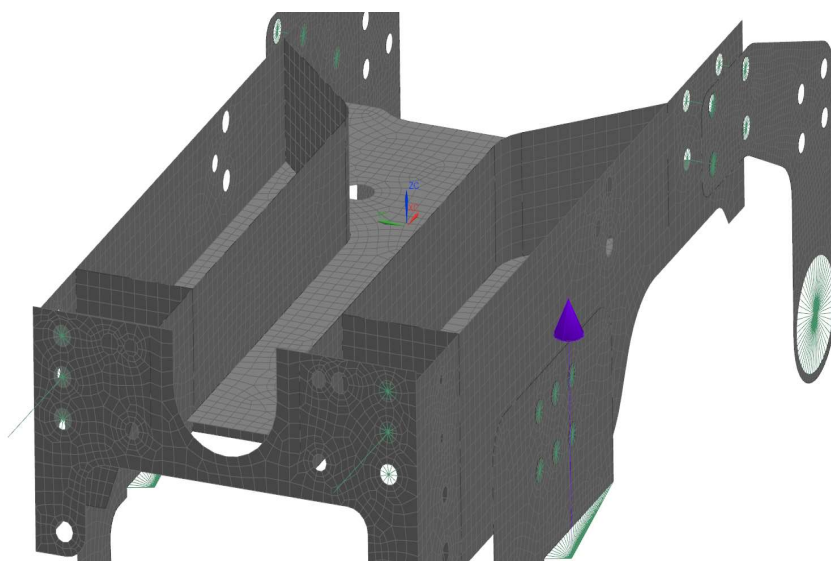


Рисунок 4 - Общий вид конечно-элементной модели кронштейнов и стенки

Для расчета используется марка стали 09Г2С, представляет из себя широко применяющуюся низколегированную конструкционную сталь, кривая усталости приведена на рисунке 5.

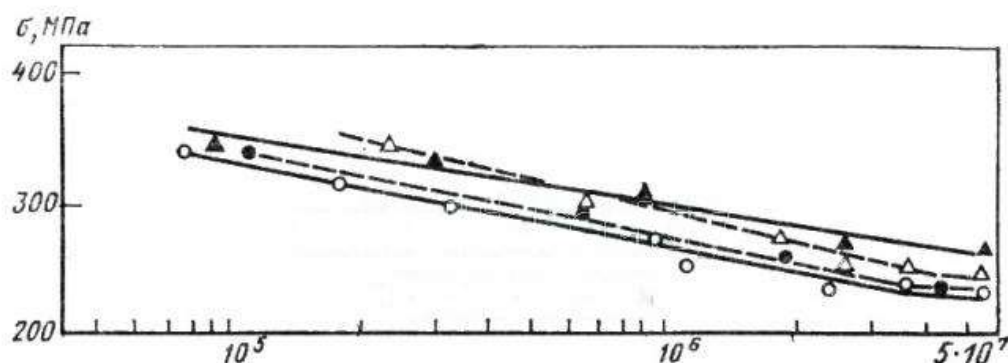


Рисунок 5 - Кривая усталости стали 09Г2С термически обработанной и горячекатанной

С помощью уравнения Баскина определим перегибы на кривой усталости [1]:

$$\sigma_i^m \cdot N_i = \sigma_{i+1}^m \cdot N_{i+1} \quad (7)$$

$$m = \frac{\ln \frac{N_{i+1}}{N_i}}{\ln \frac{\sigma_i}{\sigma_{i+1}}}, \quad (8)$$

где  $m$  – показатель степени на кривой сопротивление усталости;  
 $N_i$  – число циклов нагружения до разрушения на  $i$ -ом перегибе;  
 $\sigma_i$  – действующие напряжения для соответствующего числа циклов на  $i$ -ом перегибе.  
 Для расчета воспользуемся формулой нахождения повреждаемости, вносимой в конструкцию за 1 час эксплуатации от повторно статического нагружения

$$P_{\text{псн}} = n \cdot \frac{1}{N \cdot \left( \frac{\sigma_a}{\sigma_{a\text{псн}}} \right)^{mi}}, \quad (9)$$

где  $n$  – повторяемость повторно- статического нагружения;  
 $\sigma_a$  – значение амплитуды напряжения по кривой;  
 $\sigma_{aПСН}$  – действующие амплитуды напряжения в конструкции;  
 $N$  – количество циклов для разрушения при заданном  $\sigma_a$ .

Тогда повреждаемость от вибрационного нагружения вносимой в конструкцию за 1 час эксплуатации составит

$$P_{\text{виб}} = n_{\text{виб}} \cdot \frac{1}{N \cdot \left(\frac{\sigma_{a\text{ВИБ}}}{\sigma_{a\text{ПСН}}}\right)^{mi}}, \quad (10)$$

где  $n$  – повторяемость вибрационной составляющей нагружения;  
 $\sigma_{a\text{ВИБ}}$  – значение амплитуды вибрационного напряжения по кривой;  
 $\sigma_{a\text{ПСН}}$  – действующие амплитуды напряжения в конструкции;  
 $N$  – количество циклов для разрушения при заданном  $\sigma_{a\text{ВИБ}}$ .

Суммарная повреждаемость, вносимая в конструкцию от вибрационного и повторно-статического нагружения

$$P_{\text{СУМ}} = \sum P = \sum_{i=1}^{n=4} \frac{1}{N \cdot \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_{ai}}\right)^{mi}}, \quad (11)$$

в котором  $n_{\text{виб}}$  можно найти как

$$n_{\text{виб}} = f \cdot \mu_N, \quad (12)$$

где  $f$  – действующая частота в конструкции;  
 $\mu_N$  – коэффициент запаса по числу циклов.

Тогда расчетное значение ресурса

$$R_i = \frac{1}{P_{\text{СУМ}} \cdot \mu_{\Sigma}}, \quad (13)$$

где  $\mu_{\Sigma}$  – коэффициент запаса на гипотезу линейного суммирования.

### Заключение

Анализируя полученные результаты расчеты конечно-элементной модели лонжеронов трактора, можно выделить несколько элементов, с наибольшим НДС в узлах. Такими элементами являются элементы со следующими порядковыми номерами: 4976, 4975, 4971, 5219, 6028. Поскольку нагружение симметричное, в модели рассматривался правый лонжерон. По модели отчетливо видно, что данные элементы находятся в зоне с наибольшим растягивающим напряжением.

При расчете рассматривались следующие типы нагружения при эксплуатации МЭС [18-28]: МЭС без навески технологического оборудования, с навеской оборудования в передней части, с задней навеской. Соответственно были получены величины действующих усилий при каждом расчетном случае (РС). Полурама наиболее нагружена при передней навеске, в данном случае усилие на элемент системы поддрессирования принималось 2450 кг. В случае задней навески, усилие на элемент 2100 кг. В МЭС без навески на элемент приходилось 2000 кг. Усилие в модели прикладывалось в местах крепления пневмоэлементов с каждой стороны, результаты расчета для МЭС в базовом варианте и с разработанной АСП по наиболее явному расчетному случаю представлены в таблицах 2,3.

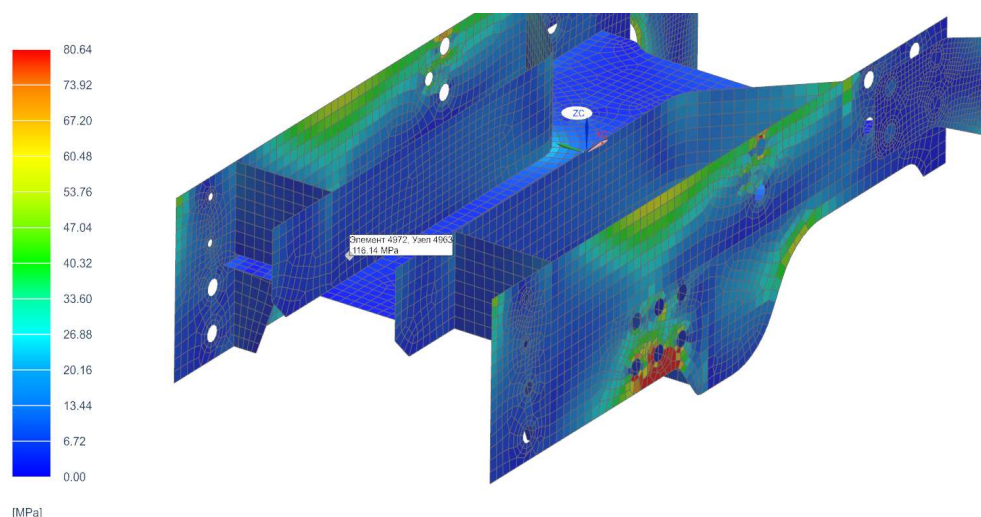
Таблица 2 - Результаты расчеты в случае передней навески для базового варианта трактора

Номер элемента	Нагрузка, кг	$\sigma_{\max}$ , кгс/см <sup>2</sup>	$\sigma_m$ , кгс/см <sup>2</sup>	$\sigma_a$ , кгс/см <sup>2</sup>	Ппсн	Пвиб	R, часов
4976	2450	17,21	8,605	8,605	5,56E-10	0,000730765	10947,42
4975	2450	13,95	6,975	6,975	1,57E-10	0,000207271	38596,85
4971	2450	14,33	7,165	7,165	1,85E-10	0,00024354	32848,83
5219	2450	14,2	7,1	7,1	1,75E-10	0,000230581	34695,01
6028	2450	8,25	4,125	4,125	6,75E-12	8,86E-06	902138,94

Таблица 3 - Результаты расчеты в случае передней навески (варианта трактора с новой АСП)

Номер элемента	Нагрузка, кг	$\sigma_{max}$ , кгс/см <sup>2</sup>	$\sigma_m$ , кгс/см <sup>2</sup>	$\sigma_a$ , кгс/см <sup>2</sup>	Ппсн	Пвиб	R, часов
4976	1936	15,57	7,78	7,78	3,05E-10	0,000400704	19964,82
4975	1936	12,62	6,31	6,31	8,65E-11	0,000113618	70411,07
4971	1936	12,2	6,1	6,1	7,06E-11	0,000092737	86265,69
5219	1936	12,85	6,42	6,42	9,64E-11	0,000126623	63179,81
6028	1936	7,47	3,73	3,73	3,72E-12	4,88E-06	1637093,61

Из представленных результатов наглядно видно, что в случае разработанной системы, усилие, приходящееся на элемент системы поддрессирования ниже на 21,5%. Поскольку значение ресурса является степенной функцией, данное снижение приходящихся усилий на элемент оказывает существенное влияние на значение ресурса в часах. Так, наиболее нагруженная зона переднего лонжерона по ресурсному показателю превосходит систему в базовом варианте трактора почти в 2 раза (рисунок 6).



**Рисунок 6 - Результаты расчета напряженно-деформируемого состояния базового варианта переднего моста МЭС с системой поддрессирования**

Из приведенного соотношения видно, что давление на почву прямо пропорционально усилию, действующему со стороны подвески в сторону опорного основания, что позволяет сделать вывод, что снижение усилия в подвеске в сторону шины, а далее в сторону опорного основания позволит снизить максимальное нормальное давление движителя на почву, в данном случае, на 21,5%.

Оценка эффективности адаптивной системы поддрессирования сельскохозяйственных мобильных энергетических средств с необходимыми функциональными и эксплуатационными характеристиками (расчет и комментарии по снижению нагруженности на 15-25 %, расчет на этой основе снижения максимального давления на почву, повышение долговечности элементов конструкции). В заключении: применение АСП позволяет получить синергетический эффект ввиду снижения на почву и повышение сопротивления усталости долговечности элементов конструкции подвергающихся в механическом колебательным воздействиям от неровностей микропрофиля дорог и полей в процессе движения МЭС.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда — Соглашение № 23-29-00289, от 13.01.2023, <https://rscf.ru/project/23-29-00289/>.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каратушин, С.И. Конструкционная прочность: учебное пособие/ С.И. Каратушин, И.Н. Титух; Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2020. – 39 с.
2. Штерн Ю. И., Кожевников Я. С., Рыков В. М., Миронов Р. Е., Штерн М. Ю. Разработка математических моделей для интеллектуальных систем управления прецизионным термическим оборудованием // Известия вузов. Электроника. 2010. №2 (82). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-matematicheskikh-modeley-dlya-intellektualnyh-sistem-upravleniya-pretsizionnym-termicheskim-oborudovaniem-1> (дата обращения: 05.05.2023).
3. Li B. Coordinated control of gear shifting process with multiple clutches for power-shift transmission / B. Li, D. Sun, M. Hu, X. Zhou, J. Liu, D. Wang // Mech. Mach. Theory, – 2019. – V. 140. – P. 274-291.
4. Kuznetsov N.K. Reducing of dynamic loads of excavator actuators / N.K. Kuznetsov, I.A. Iov, A.A. Iov // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, – 2019, – V. 1., – P. 012075. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1210/1/012075>
5. Оценка влияния параметров шин на управляемость автомобиля / З. А. Годжаев, В. И. Прядкин, А. В. Артемов, П. А. Колядин // Автомобильная промышленность. – 2023. – № 2. – С. 14-19. – EDN NUYPUI.
6. Годжаев, З. А. Применение адаптивных ходовых систем поддрессирования МЭС для снижения виброактивности от опорной поверхности / З. А. Годжаев, И. С. Малахов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2022. – № 6(356). – С. 138-142. – DOI 10.33979/2073-7408-2022-356-6-138-142. – EDN JRCJAZ.
7. Оценка вибронегруженности рабочего места оператора мобильной рубильной машины / В.Н. Лой, А.О. Германович // Труды БГТУ. №2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. – 2015. – №2 (175). – С. 3-7.
8. Melikov I. Traction and energy efficiency tests of oligomeric tires for category 3 tractors / I. Melikov, V. Kravchenko, S. Senkevich, E. Hasanova, L. Kravchenko // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – V. 403. – P. 012126. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/403/1/012126>
9. Dygalo, V. Formation of basic performance properties of wheeled vehicles in braking mode / V. Dygalo, M. Lyashenko, V. Shekhovtsov // Transportation Research Procedia: 14, Saint Petersburg, 21–24 октября 2020 года. – Saint Petersburg, 2020. – P. 130-135. – DOI 10.1016/j.trpro.2020.10.016.
10. Shekhovtsov, V. V. Technology of creation of three-dimensional model of tractor transmission in program package "universal mechanism" / V. V. Shekhovtsov, N. S. Sokolov-Dobrev, M. V. Lyashenko // Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2019. – No 9783319956299. – P. 2017-2025. – DOI 10.1007/978-3-319-95630-5\_217.
11. ГОСТ Р 58656-2019 Национальный стандарт российской федерации, Техника сельскохозяйственная мобильная методы определения воздействия движителей на почву, дата введения 2020-08-01
12. Calculated and experimental tests of dynamic vibration isolators for use in the suspension system of the traction vehicle cabin / V. Shekhovtsov, M. Lyashenko, P. Potapov [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: Design Technologies for Wheeled and Tracked Vehicles, MMBC 2019, Moscow, 01–02 октября 2019 года. – Moscow: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 012022. – DOI 10.1088/1757-899X/820/1/012022.
13. Special aspects of the test of ATV equipped with the electronic engine management system Continental M3C on a dynamometer test bench / D. Ilyushin, Ye. A. Salykin, V. Shekhovtsov [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: Design Technologies for Wheeled and Tracked Vehicles, MMBC 2019, Moscow, 01–02 октября 2019 года. – Moscow: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 012011. – DOI 10.1088/1757-899X/820/1/012011.
14. Venhovens P.J.T. The Development and Implementation of Adaptive Semi-Active Suspension Control\* // Veh. Syst. Dyn. 1994. Vol. 23, № 1. P. 211–235.
15. Прентковский О., Печелюнас Р. Динамика транспортного средства в момент экстренного торможения // Proceedings of International Conference RelStat04. Part 3. Transport and Telecommunication. – 2005. – Т. 6. – №. 3. – С. 407.
16. S. Senkevich, V. Bolshev, E. Ilchenko, P. Chakrabarti, M. Jasiński, Z. Leonowicz, M. Chaplygin. Elastic Damping Mechanism Optimization by Indefinite Lagrange Multipliers // IEEE Access, vol. 9, pp. 71784-71804, 2021, DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3078609. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9426909>
17. Chalasani R.M. Ride performance potential of active suspension systems - Part II: Comprehensive Analysis Based On A Full-Car Model. // Am. Soc. Mech. Eng. Appl. Mech. Div. AMD. 1986. Vol. 80. P. 205–234.
18. Z A Godzhaev, S E Senkevich, V A Zubina and T Z Godzhaev. Determination of the significance of quality criteria and functional limitations affecting the effectiveness of robotization of mobile energy means in crop production. 2023. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1138 012045. DOI: 10.1088/1755-1315/1138/1/012045
19. Williams R.A. Electronically controlled automotive suspensions // Comput. Control Eng. J. 1994. Vol. 5, № 3. P. 143–148.
20. Годжаев, З. А. Вибрационная защита гидравлической системы поддрессирования мобильных машин с применением активного регулирования нейросетевым контроллером / З. А. Годжаев, С. Е. Сенькевич, В. А. Кузьмин // Тракторы и сельхозмашины. – 2019. – № 4. – С. 43-49. – DOI 10.31992/0321-4443-2019-4-43-49. – EDN OZQAPF.
21. Хачатуров А.А. Динамика системы дорога – шина – автомобиль – водитель. Под ред. А.А. Хачатурова. – М.: Машиностроение, 1976. – 535 с., ил.

22. Кутыков, Г. М. Теория трактора и автомобиля: учебник для вузов / Г. М. Кутыков. – М.: Колос, 1996. – С. 271-279.
23. Проектирование полноприводных колесных машин: Учебник для вузов: П79 В 3 т. Т. 3 / Б.А. Афанасьев, Б.Н. Белоусов, Л.Ф. Жеглов и др.; Под ред. А.А. Полунгяна. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 432 с.: ил.
24. Повышение долговечности силовых передач МЭС за счет снижения их динамической нагруженности / С. Е. Сенькевич, З. А. Годжаев, Е. Н. Ильченко, И. С. Алексеев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2021. – Т. 21, № 3. – С. 22-33. – DOI 10.14529/engin210302. – EDN ZPSOCR.
25. Годжаев, Т.З. Обоснование функциональных характеристик сельскохозяйственных мобильных энергосредств в многокритериальной постановке / Т.З. Годжаев, В. А. Зубина, И. С. Малахов // Тракторы и сельхозмашины. – 2022. – Т. 89, № 6. – С. 411-420. – DOI 10.17816/0321-4443-121325. – EDN XTFDEB.
26. Годжаев, З. А. Разработка стенда для испытания системы управления беспилотным зерноуборочным комбайном / З. А. Годжаев, Н. С. Крюковская, С. Е. Сенькевич // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 5-14. – DOI 10.14529/engin200301. – EDN XMQJJW.
27. Годжаев, З. А. Перспективные проекты по созданию роботизированных мобильных энергетических средств сельскохозяйственного назначения / З. А. Годжаев, С. Е. Сенькевич, В. А. Кузьмин // Материалы XII мультиконференции по проблемам управления (МКПУ-2019): Материалы XII мультиконференции. В четырех томах, Дивноморское, Геленджик, 23–28 сентября 2019 года. Том 2. – Дивноморское, Геленджик: Издательство Южного федерального университета, 2019. – С. 127-129. – EDN YXYDVI.
28. К вопросу синтеза системы управления технологическими процессами при выполнении полевых операций мобильным энергосредством / З. А. Годжаев, С. Е. Сенькевич, С. Э. Лонин [и др.] // Современные тенденции в научном обеспечении агропромышленного комплекса: Коллективная монография / Под редакцией В.В. Окоркова. – Иваново: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Верхневолжский федеральный аграрный научный центр", 2019. – С. 262-265. – EDN WBHNLA.

**Годжаев Захид Адыгезалович**  
ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, г. Москва

Профессор, доктор технических наук, главный научный сотрудник, заведующий отделом «Мобильные энергосредства»  
109428, РФ, г. Москва, 1-й Институтский проезд, дом 5  
Тел. (499) 171–43–49  
E-mail: fic51@mail.ru

**Сенькевич Сергей Евгеньевич**  
ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, г. Москва

Доцент, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией «Автоматизированный привод сельскохозяйственной техники»  
109428, РФ, г. Москва, 1-й Институтский проезд, дом 5  
Тел. (499) 171–43–49  
E-mail: sergej\_senkevich@mail.ru

**Малахов Иван Сергеевич**  
ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, г. Москва

Младший научный сотрудник сектора «Моделирование и оптимизация МЭС»  
109428, РФ, г. Москва, 1-й Институтский проезд, дом 5  
Тел. (499) 171–43–49  
E-mail: malahovivan2008@mail.ru

**Уютов Сергей Юрьевич**

ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, г. Москва  
Младший научный сотрудник лаборатории «Автоматизированный привод сельскохозяйственной техники»  
109428, РФ, г. Москва, 1-й Институтский проезд, дом 5  
Тел. (499) 171–43–49  
E-mail: s\_uytov@mail.ru

Z.A. GODZHAEV, S.E. SENKEVICH, I.S. MALAKHOV, S.Y. UYUTOV

## EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF APPLICATION OF ADAPTIVE SYSTEM OF AGRICULTURAL MOBILE POWER VEHICLES SUSPENSION

**Abstract.** In this paper, an adaptive MES suspension is presented and investigated. The MES adaptive suspension has been investigated for the degree of influence on the soil background (agrophon). Strength calculations by finite element method have been carried out. The model of brackets and wall is calculated, where mass-dimensional and elastic-damping properties of MES structural elements are used as initial data, based on tractor of traction class 3, obtained by calculation-experimental way and real support base (agrophon) with known micro- and macro-profile and the results of theoretical calculations are presented.

**Keywords:** adaptive suspension system, mobile power vehicles, efficiency, suspension system.

## BIBLIOGRAPHY

1. Karatushin, S.I. Structural strength: textbook / S.I. Karatushin, I.N. Titukh; Baltic State Geochemical University. - SPb., 2020. - 39 c.
2. Shtern Yu. I., Kozhevnikov Ya. S. S., Rykov V. M., Mironov R. E., Stern M. Yu. Development of the mathematical models for the intelligent control systems for the precision thermal equipment // *Izvestia Vuzov. Electronics*. 2010. №2 (82). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-matematicheskikh-modeley-dlya-intellektualnyh-sistem-upravleniya-precizionnym-termicheskim-oborudovaniem-1> (accessed on 05.05.2023).
3. Li B. Coordinated control of gear shifting process with multiple clutches for power-shift transmission / B. Li, D. Sun, M. Hu, X. Zhou, J. Liu, D. Wang // *Mech. Mach. Theory*, - 2019. - V. 140. - P. 274-291.
4. Kuznetsov N.K.. Reducing of dynamic loads of excavator actuators / N.K. Kuznetsov, I.A. Iov, A.A. Iov // *Journal of Physics: Conference Series*. Kuznetsov, I.A. Iov, A.A. Iov // *Journal of Physics: Conference Series*. - IOP Publishing, - 2019, - V. 1., - P. 012075. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1210/1/012075>
5. Estimation of the influence of tire parameters on car controllability / Z. A. Gojaev, V. I. Pryadkin, A. V. Artemov, P. A. Kolyadin // *Automobile industry*. - 2023. - № 2. - C. 14-19. - EDN NUYPUI.
6. Gojaev, Z. A. Application of adaptive running systems of MES underpressure support to reduce vibration activity from the supporting surface / Z. A. Gojaev, I. S. Malakhov // *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*. - 2022. - № 6(356). - C. 138-142. - DOI 10.33979/2073-7408-2022-356-6-138-142. - EDN JRCJAZ.
7. Estimation of vibration loading of the workplace of the mobile chopping machine operator / V.N. Loy, A.O. Germanovich // *Proceedings of BSTU. №2. Forest and woodworking industry*. - 2015. - №2 (175). - C. 3-
8. Melikov I. Traction and energy efficiency tests of oligomeric tires for category 3 tractors / I. Melikov, Melikov, V. Kravchenko, S. Senkevich, E. Hasanova, L. Kravchenko // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. - 2019. - V. 403. - P. 012126. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/403/1/012126>
9. Dygalo, V. Formation of basic performance properties of wheeled vehicles in braking mode / V. Dygalo, M. Lyashenko, V. Shekhovtsov // *Transportation Research Procedia: 14, Saint Petersburg, Russia*. Dygalo, M. Lyashenko, V. Shekhovtsov // *Transportation Research Procedia: 14, Saint Petersburg, October 21-24, 2020*. - Saint Petersburg, 2020. - P. 130-135. - DOI 10.1016/j.trpro.2020.10.016.
10. Shekhovtsov, V. V. Technology of creation of three-dimensional model of tractor transmission in program package "universal mechanism" / V. V. V. Shekhovtsov, N. S. Sokolov-Dobrev, M. V. Lyashenko // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. - 2019. - No 9783319956299. - P. 2017-2025. - DOI 10.1007/978-3-319-95630-5\_217.
11. GOST R 58656-2019 National standard of the Russian Federation, Agricultural mobile machinery methods for determining the impact of the thrusters on the soil, date of introduction 2020-08-01
12. Calculated and experimental tests of dynamic vibration isolators for use in the suspension system of the traction vehicle cabin / V. Shekhovtsov, M. Lyashenko, P. Potapov [et al.] // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: Design Technologies for Wheeled and Tracked Vehicles, MMBC 2019, Moscow, October 01-02, 2019*. - Moscow: Institute of Physics Publishing, 2020. - P. 012022. - DOI 10.1088/1757-899X/820/1/012022.
13. Special aspects of testing the ATV equipped with Continental M3C electronic engine control system on the dynamometer / D. Ilyushin, E. A. Salykin, V. Shekhovtsov [et al. A. Salykin, V. Shekhovtsov [et al]] // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: Design Technologies for Wheeled and Tracked Vehicles, MMBC 2019, Moscow, October 01-02, 2019*. - Moscow: Institute of Physics Publishing House, 2020. - P. 012011. - DOI 10.1088/1757-899X/820/1/012011.
14. Venhovens P.J.T.. The Development and Implementation of Adaptive Semi-Active Suspension Control\* // *Veh. Syst. Dyn.* 1994. Vol. 23, № 1. P. 211-235.
15. Prentkovskiy O., Pecheliunas R. Vehicle dynamics at the moment of emergency braking // *Proceedings of the International Conference RelStat04. Part 3. Transportation and Telecommunications*. - 2005. - T. 6. - №. 3. - C. 407.
16. C. Sienkiewicz, V. Balshev, E. Ilchenko, P. Chakrabarti, M. Jasinski, Z. Leonowicz, M. Chaplygin. Optimization of Elastic Damping Mechanism with Undefined Lagrange Multipliers // *IEEE Access*, vol. 9, pp. 71784-71804, 2021, DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3078609. <https://ieeexplore.ieee.org/document/94269>
17. Chalasani R.M. Ride performance potential of active suspension systems - Part II: Comprehensive Analysis Based On A Full-Car Model. // *Am. Soc. Mech. Eng. Appl. Mech. Div. AMD*. 1986. Vol. 80. P. 205-234.
18. Z A Godzhaev, S E Senkevich, V A Zubina and T Z Godzhaev. Determination of the significance of quality criteria and functional limitations affecting the effectiveness of robotization of mobile energy means in crop production. 2023. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 1138 012045. DOI: 10.1088/1755-1315/1138/1/012045
19. Williams R.A. Electronically controlled automotive suspensions // *Comput. Control Eng. J.* 1994. Vol. 5, № 3. P. 143-148.
21. Gojaev, Z. A. Vibration protection of the hydraulic system of mobile machinery underpressure with the use of active regulation by neural network controller / Z. A. Gojaev, S. E. Senkevich, V. A. Kuzmin // *Tractors and agricultural machines*. - 2019. - № 4. - C. 43-49. - DOI 10.31992/0321-4443-2019-4-43-49. - EDN OZQAPF.
22. Khachaturov, A.A. Dynamics of the system road - tire - car - driver. Edited by A.A. Khachaturov. - M.: Mashinostroenie, 1976. - 535 p., ill.
23. Kutkov, G. M. Theory of tractor and automobile: textbook for universities / G. M. Kutkov. - Moscow: Kolos, 1996. - C. 271-279.

24. Design of all-wheel drive wheeled machines: Textbook for universities: P79 In 3 vol. T. 3 / B.A. Afanasyev, B.N. Belousov, L.F. Zheglov et al.; Edited by A.A. Polungyan. - Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2008. - 432 p.: ill.

25. Durability increases of the MES power transmissions at the expense of their dynamic loading reduction (in Russian) / S. E. Senkevich, Z. A. Gojaev, E. N. Ilchenko, I. S. Alekseev // Bulletin of the South Ural State University. Series: Engineering. - 2021. - T. 21, № 3. - C. 22-33. - DOI 10.14529/engin210302. - EDN ZPSOCR.

26. Gojaev, T.Z. Justification of the functional characteristics of the agricultural mobile power means in a multicriteria setting / T.Z. Gojaev, V.A. Zubina, I.S. Malakhov // Tractors and agricultural machines. - 2022. - T. 89, № 6. - C. 411-420. - DOI 10.17816/0321-4443-121325. - EDN XTFDEB.

27. Gojaev, Z. A. Development of a stand for testing the control system of an unmanned combine harvester / Z. A. Gojaev, N. S. Kryukovskaya, S. E. Senkevich // Bulletin of South Ural State University. Series: Engineering. - 2020. - T. 20, № 3. - C. 5-14. - DOI 10.14529/engin200301. - EDN XMQJJW.

28. Gojaev, Z. A. Perspective projects for the creation of robotic mobile energy means for agricultural purposes / Z. A. Gojaev, S. E. Senkevich, V. A. Kuzmin // Proceedings of the XII Multiconference on Management Problems (MKPU-2019): Proceedings of the XII Multiconference. In four volumes, Divnomorskoye, Gelendzhik, September 23-28, 2019. Volume 2. - Divnomorskoye, Gelendzhik: Publishing house of the Southern Federal University, 2019. - C. 127-129. - EDN YXYDVI.

29. To the issue of synthesizing the control system of technological processes when performing field operations by mobile power means / Z. A. Gojaev, S. E. Senkevich, S. E. Lonin [et al] // Modern trends in scientific support of agroindustrial complex: Collective monograph / Edited by V. V. Okorkov. - Ivanovo: Federal State Budgetary Scientific Institution "Verkhnevolzhsky Federal Agrarian Scientific Center", 2019. - C. 262-265. - EDN WBHNLA.

**Godzhaev Zakhid Adygezalovich**

FSBSI FSAC VIM, Moscow

Professor, Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher,

Head of the Mobile Energy Vehicles Department

109428, Russia, Moscow, 1st Institutsky proezd, 5

Тел. (499) 171-43-49

E-mail: fic51@mail.ru

**Senkevich Sergey Evgenevich**

FSBSI FSAC VIM, Moscow

Associate Professor, Candidate of Technical Sciences,  
Senior Researcher, Head of the Laboratory "Automated  
Drive of Agricultural Machinery"

109428, Russia, Moscow, 1st Institutsky proezd, 5

Тел. (499) 171-43-49

E-mail: sergej\_senkevich@mail.ru

**Malakhov Ivan Sergeevich**

FSBSI FSAC VIM, Moscow

Junior Researcher of the MES

Modeling and Optimization Sector

109428, Russia, Moscow, 1st Institutsky proezd, 5

Тел. (499) 171-43-49

E-mail: malahovivan2008@mail.ru

**Uyutov Sergey Yurevich**

FSBSI FSAC VIM, Moscow

Junior researcher of the laboratory "Automated drive of  
agricultural machinery"

109428, Russia, Moscow, 1st Institutsky proezd, 5

Тел. (499) 171-43-49

E-mail: s\_uyutov@mail.ru

© З.А. Годжаев, С.Е. Сенькевич, И.С. Малахов, С.Ю. Уютов, 2024

А.В. ДОЛОГЛОНЯН, В.Т. МАТВЕЕНКО, А.Г. КЛИМЕНКО

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИБКИХ КОМБИНИРОВАННЫХ МИКРОГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК НА БАЗЕ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПРОМПОДОГРЕВОМ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

**Аннотация.** Предметом рассмотрения в статье являются методы усложнения циклов микрогазотурбинных установок (МГТУ) с целью дальнейшего повышения их гибкости и экономичности. Выбрано направление более глубокой утилизации теплоты выхлопных газов базового микрогазотурбинного двигателя (МГТД) с промежуточным подогревом (ПП) рабочего тела превратив ее в работу в установке органического цикла Ренкина (ОЦР). Установлено, что экономичность комбинированной МГТУ с установкой ОЦР зависит от конфигурации базовой МГТУ, ОЦР и рода хладагента и выше по сравнению с базовой конфигурацией МГТУ. Для комбинированной МГТУ на базе простого цикла (ПЦ) эффективность возросла в 1,38...2, для более эффективных базовых конфигураций МГТУ КПД вырос в 1,08...1,26 раза. Отмечено, что МГТУ на базе МГТД ПЦ с регенерацией, ПП и установкой ОЦР с хладагентом R-123 является наиболее универсальной и эффективной, а МГТУ на базе ПЦ с ПП и установкой ОЦР может обеспечить наибольший прирост электрической мощности. Показано, что для повышения гибкости комбинированных МГТУ можно использовать режимы эксплуатации как с разделяющимся потоком теплоты, так и с переключающимся потоком теплоты, дополненные тепловыми аккумуляторами и возобновляемыми источниками энергии.

**Ключевые слова:** микрогазотурбинная установка, регенерация теплоты, турбина перерасширения, турбокомпрессорный утилизатор, органический цикл Ренкина, гибкость, когенерация.

### Введение

Малая, точнее распределенная энергетика особенно важна для энергообеспечения объектов нулевой и первой категории (они должны иметь несколько источников энергоснабжения), для энергообеспечения районов с низкой плотностью нагрузки, для автономного энергоснабжения удаленных объектов, для снабжения в чрезвычайные периоды, а также в отдаленных, труднодоступных и малоосвоенных районах. Кроме того, тепловая и конструктивная схема когенерационной установки должна быть приспособлена к производству требуемого количества энергии (электрической и тепловой) для разных потребителей при циклической или переменной нагрузке, компенсируя суточные и сезонные колебания.

Среди различных типов энергоустановок [1] вызывает интерес микрогазотурбинные (мощностью до 1 МВт) установки, как способные работать на органических видах топлива с различными способами усложнения рабочего цикла двигателя [2]. Из преимуществ МГТУ следует отметить [3]:

- компактность;
- высокий ресурс;
- низкие шум и вибрацию в т.ч. возможность устанавливать на крышу;
- существенно более простую эксплуатацию, в том числе в зимних условиях;
- возможность достижения низких уровней эмиссии  $NO_x$ .

Из недостатков МГТУ следует указать:

- высокая удельная стоимость (по сравнению с газопоршневыми машинами);
- высокое давление топливного газа, что требует дожимающего компрессора;
- низкий КПД двигателя.

И если первый недостаток частично компенсируется высокой компактностью, второго недостатка можно избежать переходом на жидкое топливо (дизельное топливо, керосин и т.п.), то низкий КПД по электроэнергии можно компенсировать только двумя способами:

- повышением эффективности элементов МГТУ (компрессор, турбина, камера сгорания), что позволит, кроме всего прочего, поднять и параметры цикла (температура, давление);

- применением сложных циклов с глубокой утилизацией теплоты в т.ч. комбинированных циклов.



Для достижения гибкости в объемах производства энергии и высокой тепловой эффективности газотурбинной энергетической установки можно применить различные тепловые и конструктивные схемы.

Представляют интерес установки с промежуточным подогревом (ПП) рабочего тела, которые кроме повышенной удельной работы, обладают также и повышенной удельной теплотой, переданной на теплоснабжение, т.е. большим утилизационным потенциалом. Также они обладают более широкими возможностями регулирования производительности.

В данной работе будут рассмотрены характеристики сложных и комбинированных циклов микрогазотурбинных установок с промподогревом рабочего тела.

### Основная часть

#### 1. Базовые схемы МГТУ с ПП, работающих на органическом топливе.

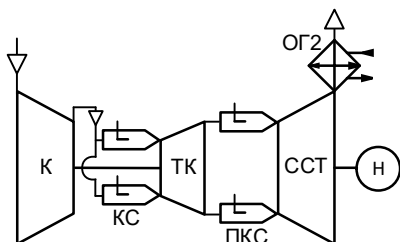
В общем случае, схемы микрогазотурбинных двигателей (МГТД) для МГТУ с ПП могут быть с блокированной турбиной и свободной силовой турбиной (ССТ). Безусловно, блокированные двигатели эффективнее на номинальном режиме, однако на долевых нагрузках машины со ССТ имеют преимущество. Наиболее перспективной, с практической точки зрения, является схема, представляющая собой газогенератор со ССТ и с промежуточной камерой сгорания (ПКС) между ними.

Микрогазотурбинные двигатели (МГТД) находят применение как для энергообеспечения локальных объектов, так и стационарных, технологических и транспортных подводных и надводных объектов. За основу базовой схемы МГТУ с ПП принят МГТД простого цикла (см. рисунок 1), который можно усложнить с целью увеличения КПД.

Усложнение ГТД простого цикла (ПЦ) осуществляется за счет:

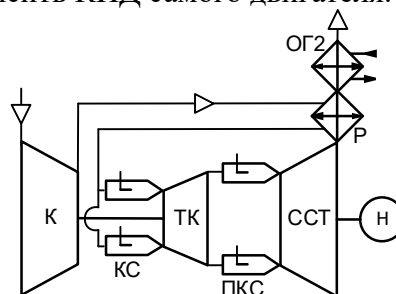
- регенерации теплоты выхлопных газов в рабочем цикле двигателя;
- применения турбины перерасширения рабочего тела за силовой турбиной [4-7] с целью повышения мощности ГТД;
- применения комбинации предыдущих методов.

На рисунке 2 изображена схема МГТУ с регенерацией теплоты и промподогревом (ПЦ+Р+ПП), в которой по отношению к схеме МГТУ простого цикла добавлен теплообменник-регенератор для подогрева рабочего тела перед камерой сгорания за счет теплоты выхлопных газов двигателя, что позволяет повысить КПД самого двигателя.



**Рисунок 1 – Схема когенерационной МГТУ простого цикла (ПЦ) с ПП:**

К – компрессор; КС – камера сгорания; ПКС – промежуточная камера сгорания; ТК – турбина компрессора; ССТ – свободная силовая турбина; ОГ2 – охладитель газов; Н – нагрузка



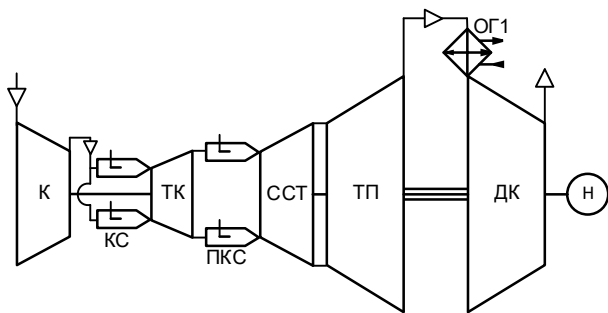
**Рисунок 2 – Схема когенерационной МГТУ цикла с регенерацией (ПЦ+Р) с ПП:**

Р – регенератор; остальные обозначения как на рисунке 1

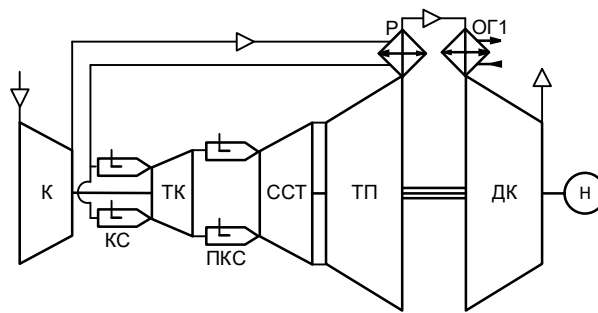
На рисунке 3 изображена схема микрогазотурбинной установки (МГТУ) с турбиной перерасширения и ПП. Турбина перерасширения, приводящая дожимающий компрессор (ДК) с охладителем газа (ОГ1) между ними, который выполняет роль котла-утилизатора, образует турбокомпрессорный утилизатор (ТКУ). Посредством применения в рабочем цикле перерасширения рабочих газов за силовой турбиной увеличивается мощность двигателя при том же расходе топлива и, следовательно, повышается КПД двигателя.

Повышение КПД МГТД возможно также за счет глубокой утилизации теплоты выхлопных газов двигателя, преобразовав часть ее в механическую работу. Такую задачу возможно решить за счет комбинации двух способов повышения экономичности МГТД с ПП, а именно, за силовой турбиной МГТД установить турбокомпрессорный утилизатор, а регенератор разместить между турбиной перерасширения и дожимающим компрессором. На

рисунке 4 изображена схема МГТУ с ТКУ и регенерацией теплоты. Охладитель газа ОГ1 обеспечивает понижение температуры газа перед ДК с целью снижения в нем работы сжатия, а также выполняет функцию котла-утилизатора для обеспечения локального объекта теплотой.



**Рисунок 3 – Схема МГТУ с турбиной перерасширения (ПЦ+ТКУ) с ПП:**  
ТП – турбина; ОГ1 – охладитель газов; ДК – дожимающий компрессор; остальные обозначения как на рисунке 1



**Рисунок 4 – Схема МГТУ с турбокомпрессорным утилизатором и регенерацией теплоты (ПЦ+ТКУ+Р) с ПП:**  
остальные обозначения как на рисунке 1-3

## 2. Методика и результаты исследования характеристик базовых МГТУ с ПП на номинальном режиме

Исследование характеристик рабочих циклов МГТУ при работе на номинальном режиме производилось с использованием физико-математических моделей и программного обеспечения, ранее опробованного при анализе параметров ГТУ, приведенных в работе [1].

В настоящее время в микрогазотурбинной технике достигнуты значительные успехи в области повышения эффективности ее элементов [8, 9]. В МГТУ необходимо учитывать конструктивные факторы, влияющие на аэродинамические характеристики компрессоров и турбин [8-10]. Так политропный КПД центробежного компрессора находится в пределах  $\eta_k = 80...82\%$ , радиально-осевой турбины  $\eta_m = 85...86,5\%$ , а адиабатный КПД диагональных лопаточных машин  $88...90\%$ . В настоящее время применение доступных сплавов ЖС36 и ЖС40 позволяет иметь температуру газа перед турбиной до  $1373\text{ К}$  включительно [11], при этом турбинная ступень высокого давления может быть неохлаждаемой. Для МГТУ характерно наличие теплообменных аппаратов, которые должны обеспечивать требуемые параметры рабочего тела в цикле, но при этом иметь оптимальные потери давления и, соответственно, габаритные размеры для МГТУ. Так при применении регенератора, габариты которого существенно зависят от конструкции теплообменной матрицы, ее плотности и площади поверхности теплопередачи, для микротурбины оптимальная степень регенерации зависит от гидравлического сопротивления регенератора и давления рабочей среды по каждой из теплообменивающихся сторон [12]. Большинство мировых производителей МГТД («Микрогазотурбинные технологии», «Elliott», «Turbec», «Ingersoll R») используют степень регенерации  $0,9$  [13, 14].

Кроме того, для МГТУ были приняты следующие ограничения по параметрам:

- максимальная степень регенерации –  $0,9$  (для обеспечения приемлемых температур перед регенератором со стороны газов);
- максимальная степень сжатия в одной ступени центробежного компрессора –  $12$  [14];
- максимальная степень сжатия в дожимающем компрессоре –  $5$  (диагональный компрессор);
- максимальная степень расширения в одной ступени турбины –  $5$  (радиально-осевая турбина) и  $6$  (центростремительная турбина).

Для моделирования установок, изображенных на рисунках 1-4, были приняты параметры, представленные в таблице 1.

## 3. Результаты исследования характеристик базовых МГТУ с ПП

Анализ характеристик циклов МГТУ производился при изменении степени повышения давления  $\pi_k$  в компрессоре двигателя, дожимающем компрессоре  $\pi_{dk}$ , степени регенерации  $\sigma$  и прочих равных фиксированных параметрах, характерных для микрогазотурбинных установок. Результаты такой оптимизации МГТУ, работающих по схемам, изображенным на рисунках 1-4 и исходных данных, приведенных в таблице 1 при максимальной температуре цикла

$T_3 = 1373$  К и температурой после ПКС  $T_{31} = T_3$ , представлены в таблице 2.

Таблица 1. Исходные данные для моделирования базовых МГТУ

Наименование параметра	Ед. изм.	Численное значение
Политропный КПД турбины	—	0,865
Политропный КПД турбины компрессора	—	0,85
Политропный КПД компрессора	—	0,82
Политропный КПД второй ступени компрессора	—	0,8
Адиабатный КПД турбины перерасширения <sup>1</sup>	—	0,9
Адиабатный КПД дожимающего компрессора <sup>2</sup>	—	0,88
КПД камеры сгорания	—	0,99
КПД электрогенератора	—	0,96
Коэффициент восстановления давления в регенеративном теплообменнике со стороны газа для ПЦ+Р <sup>3</sup>	—	$\varepsilon_z = \frac{1-r}{2c_z r} \left( \sqrt{1+4c_z \frac{r}{1-r}} - 1 \right)$
Коэффициент восстановления давления в регенеративном теплообменнике со стороны газа для ПЦ +ТКУ+Р <sup>3</sup>	—	$\varepsilon_z = \frac{1}{2c_z (\varepsilon_{oz1} \pi_{ок})^2} \frac{1-r}{r} \left( \sqrt{1+4c_z (\varepsilon_{oz1} \pi_{ок})^2 \frac{r}{1-r}} - 1 \right)$
Коэффициент восстановления давления в регенеративном теплообменнике со стороны воздуха <sup>3</sup>	—	$\varepsilon_a = 1 - \frac{c_a}{\pi_k^2} \frac{r}{1-r}$
Коэффициент восстановления давления на входе в установку, $\varepsilon_{вх}$	—	0,96
Коэффициент восстановления давления в промежуточном охладителе воздуха, $\varepsilon_{ов}$	—	0,94
Коэффициент восстановления давления в КС, $\varepsilon_{кс}$	—	0,96
Коэффициент восстановления давления на выходе из установки, $\varepsilon_{вых}$	—	0,97
Коэффициент восстановления давления охладителей газа (ОГ1 и ОГ2), $\varepsilon_{ог1}$ , $\varepsilon_{ог2}$	—	0,96
Температура газов на выходе из ОГ1 и ОГ2	К	323
Температура окружающего воздуха	К	288
Влажность окружающего воздуха	%	60
<b>Примечания</b> 1, 2 – более высокие параметры компрессора и турбины связаны с масштабным эффектом в вакуумном цикле, поскольку давление рабочего тела за турбиной ниже атмосферного примерно в 2 раза, то соответственно во столько же раз размеры проточных частей компрессора и турбины больше, чем у компрессора и турбины в обычном цикле. 3 – коэффициенты $c_z$ и $c_a$ определялись из параметров существующих прототипов [12].		

Таблица 2. Результаты оптимизации базовых когенерационных МГТУ с ПП на номинальном режиме с учетом ограничений

Наименование параметра	Ед. изм.	ПЦ	ПЦ+Р	ПЦ+ТКУ	ПЦ+ТКУ+Р
Эффективный КПД МГТУ	%	23,2	38,3	36	40,3
Температура газов на входе в охладитель газов	К	1127	602	797	571
Оптимальная степень повышения давления в компрессоре	—	12	5,9	12	5,2
Оптимальная степень повышения давления в ДК	—	—	—	5,0	2
Оптимальная степень регенерации	—	—	0,9	—	0,9
Удельная мощность на валу силовой турбины	кДж/кг	297	225	461	281
Удельная тепловая мощность	кДж/кг	894	283	508	253
КПД теплотехнический	%	92	85	74	75

#### 4. Результаты исследования характеристик комбинированных МГТУ с ПП

Для утилизации низкопотенциальной энергии все чаще применяется цикл Ренкина с альтернативными рабочими телами, в качестве которых обычно используются органические вещества (класс соединений, в состав которых входит углерод, за исключением карбидов, карбонатов, оксидов углерода и цианидов), с более низкой, чем у воды, температурой кипения. Благодаря этому обстоятельству появляется возможность реализации цикла Ренкина при более низкой температуре и давлении конденсации выше атмосферного. Соответствующий цикл получил название органический цикл Ренкина (Organic Rankine Cycle, ОЦР). Обзор литературы показывает, что направление энергетики, связанное с утилизацией остаточного тепла (тепловых отходов) и использования альтернативных источников энергии, в последнее время интенсивно развивается [15-18].

Для моделирования комбинированных установок были приняты параметры установок ОЦР, представленные в таблице 3. В качестве парогенераторов использованы прямоточные котлы основными преимуществами которых являются: компактность, быстрое включение в работу, малое время нагрева рабочего тела и переход с режима на режим. Это очень важно, т.к. дает возможность регулирования производительности путем включения / отключения установки ОЦР в составе комбинированной МГТУ.

Таблица 3 – Параметры установок ОЦР

Наименование параметра	Ед. измерения	Численное значение
Адиабатный КПД турбины	–	0,82
КПД насоса	–	0,78
Коэффициент восстановления давления в парогенераторе	–	0,92
Коэффициент восстановления давления в конденсаторе	–	0,96
Коэффициент восстановления давления в регенеративном теплообменнике	–	0,96
Степень регенерации	–	0,9
Минимальный температурный напор на выходе из испарительного пучка ( $\Delta T_2$ )	К	15
Температура конденсации	К	313
Расход теплоносителя	кг/с	1
Кратность циркуляции рабочего тела	–	1

Свойства рабочих тел для установок ОЦР взяты в [19] (таблица 4).

Таблица 4 – Некоторые свойства рабочих тел, использованных в этой работе

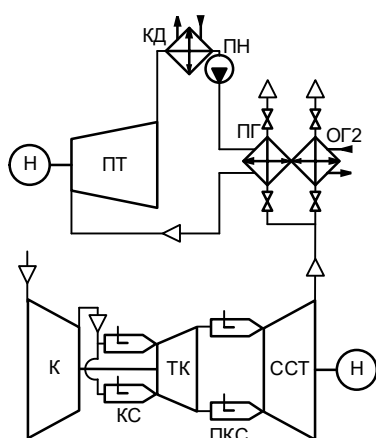
Обозначение рабочего тела	Молекулярный вес	Критическое давление, МПа	Критическая температура, К	Температура разложения, К
R-717 (аммиак)	17,03	11,33	405,4	924
R-718 (вода)	18	22,06	647,3	2470
R-123	152,93	3,66	456,83	899
R-1233zd	130,5	3,57	438,75	824
R-134a	102	4,06	374,23	682
R-245fa	134,05	3,64	427,2	659

В работах [20, 21] показано, что использование «сухих» рабочих тел целесообразно в установках ОЦР с регенерацией, а «влажных» – в установках ОЦР без регенерации. Поэтому для R-717, R-718 и R-134a будет использоваться установка ОЦР без регенерации (рисунок 5), а для R-123, R-1233zd и R-245fa – с регенерацией (см. рисунок 6).

Схемы комбинированных МГТУ на базе МГТД с ПП простого цикла и установкой ОЦР без регенерации и с регенерацией представлены на рисунках 5 и 6 соответственно.

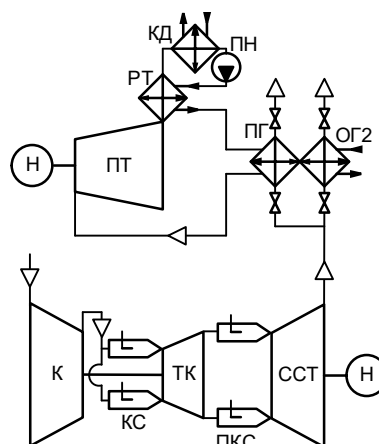
Так как температуры разложения органических рабочих тел кроме воды ниже температуры газов на входе из силовой турбины МГТУ на базе ПЦ+ПП (см. таблицу 2), то для охлаждения рабочего тела можно либо разделить охладитель газов ОГ2 (см. рисунок 1) для комбинированной МГТУ на базе ПЦ+ПП на две части, одну из которых установить за свободной силовой турбиной для сброса температуры рабочего тела, либо снизить

температуру перед свободной силовой турбиной. Снижение  $T_{31}$  с одной стороны снизит вырабатываемую МГТД мощность, с другой – повысит его КПД [22]. Однако снижение  $T_{31}$  допустимо до тех пор, пока  $T_{31}$  не сравняется с температурой на выходе из турбины компрессора, т.е. при нулевом расходе топлива в ПКС, что характерно для хладагента R-1233zd (см. таблицу 5).



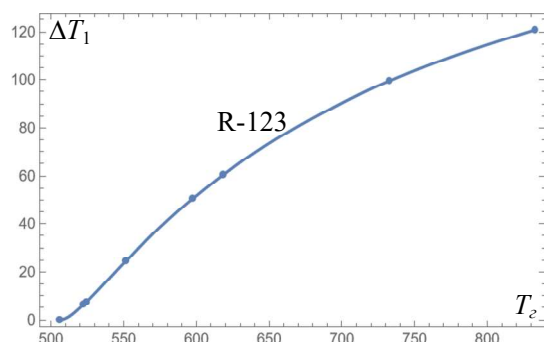
**Рисунок 5 – Схема комбинированной МГТУ на базе ПЦ+ПП и ОЦР без регенерации:**

ПТ – паровая турбина; КД – конденсатор; ПН – питательный насос; ПГ – парогенератор; остальные обозначения, как на рисунке 1

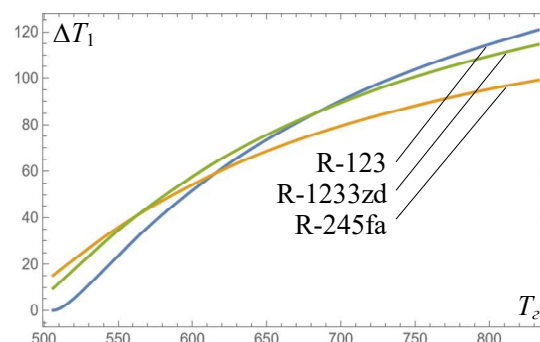


**Рисунок 6 – Схема комбинированной МГТУ на базе ПЦ+ПП и ОЦР с регенерацией:**

РТ – регенеративный теплообменник; остальные обозначения, как на рисунке 1 и 5



**Рисунок 7 – Зависимость перегрева рабочего тела (R-123) от температуры газа**



**Рисунок 8 – Сравнительная зависимость перегрева рабочих тел (R-123, R-1233zd и R-245fa) от температуры газа**

Таблица 5 – Результаты расчетов комбинированной МГТУ на базе МГТД ПЦ+ПП для хладагентов, представленных в таблице 4.

Наименование параметра	Ед. изм.	R-717	R-718	R-123	R-1233zd
Эффективный КПД МГТУ	%	36,7	47,7	40,6	39,7
Температура после ПКС ( $T_{31}$ )	К	1133	1373	1103	1038
Температура газа на входе в ПГ	К	924	1127	899	824
Давление пара на выходе из ПГ	МПа	10	10	3,6	3,6
Удельная мощность МГТД	кДж/кг	243	297	236	215
Удельная мощность на валу ПТ	кДж/кг	117	315	147	114
Относительный расход топлива в ПКС	кг/кг с.в.	0,17	0,53	0,12	0

Очень важной величиной, определяющей эффективность установки ОЦР, является перегрев рабочего тела (разница между температурой на выходе из парогенератора и температурой кипения,  $\Delta T_1$ ). В работе [20] также показано, что для «влажных» рабочих тел величина  $\Delta T_1$  должна быть максимально возможной, а для «сухих» – невелика при давлении кипения близком к критическому. Проведенные расчеты для установок ОЦР с параметрами, указанными в таблице 3 для R-123, R-1233zd и R-245fa показали, что при постоянном давлении кипения близком к критическому, оптимальная (при которой установка ОЦР производит наибольшую

работу) величина  $\Delta T_1$  зависит только от температуры газа ( $T_2$ ) на входе в парогенератор (см. рисунки 7 и 8).

Результаты расчетов комбинированных МГТУ на базе МГТД ПЦ+ПП и ОЦР при  $T_3 = 1373$  К и оптимальном  $\Delta T_1$  представлены в таблице 5.

Анализ таблицы 5 показывает, что мощность утилизационной паровой турбины определяется температурой на выходе из ОГ2 и родом рабочего тела. Поскольку температура разложения хладагента R-718 выше температуры на выходе из силовой турбины, то комбинированная МГТУ с его использованием обладает наибольшей эффективностью и удельной мощностью. Полное использование установки ОЦР дает прирост выдаваемой МГТУ мощности на 38...106 % в зависимости от рода хладагента. Так как комбинированная МГТУ имеет два независимых газовых выхода, то возможно не только переключение между ними, но и плавное перераспределение расхода рабочего тела МГТД, что обеспечивает необходимую гибкость при энергоснабжении объекта. Поскольку вода имеет давление конденсации ниже атмосферного, то ее использование в качестве рабочего тела установки ОЦР является весьма затратным, т.к. такая установка потребует постоянного обслуживания (подпитка, водоподготовка и пр.) и ее использование в составе МГТУ будет неудобным. В тоже время, органические рабочие тела имеют давление конденсации выше атмосферного, что позволяет создавать установки ОЦР в герметичном и полугерметичном исполнении и поэтому являются более предпочтительными. Установки на базе R-717 требуют очень высокого для микротурбинных установок давления в ПГ. Установки на базе R-134a и R-245fa не могут существовать, потому что температура их разложения ниже температуры газов на выходе из турбины компрессора. Установка на базе R-1233zd для схем, изображенных на рисунках 5 и 6 не имеет смысла. Таким образом, из оставшихся рабочих тел для установки ОЦР самым целесообразным является R-123 (см. таблицу 5).

Поскольку температура газов на выходе из регенератора (см. таблицу 2) для МГТУ на базе МГТД ПЦ+Р+ПП меньше температуры разложения любого из хладагентов, представленных в таблице 4, то необходимость в предварительном их охлаждении отсутствует. Это, в свою очередь, упрощает схему утилизации теплоты по сравнению с МГТУ на базе МГТД ПЦ+ПП. Схемы комбинированных МГТУ на базе МГТД ПЦ+Р+ПП и установкой ОЦР без регенерации и с регенерацией представлены на рисунках 9 и 10 соответственно.

Результаты расчетов комбинированных МГТУ на базе МГТД ПЦ+Р+ПП и ОЦР при  $T_3 = T_{31} = 1373$  К и оптимальном  $\Delta T_1$  представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты расчетов комбинированной МГТУ на базе МГТД ПЦ+Р+ПП для хладагентов, представленных в таблице 4.

Наименование параметра	Ед. изм.	R-717	R-718	R-134a	R-123	R-245fa	R-1233zd
Эффективный КПД МГТУ	%	46,2	45	42,8	48,4	47,1	47,7
Давление пара на выходе из ПГ	МПа	10	0,6	4	3,6	3,6	3,6
Удельная мощность на валу ПТ	кДж/кг	46,6	39	26,3	59,4	51,8	55,1

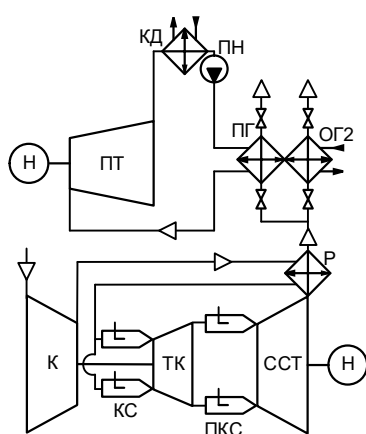


Рисунок 9 – Схема комбинированной МГТУ на базе ПЦ+Р+ПП и ОЦР без регенерации:  
остальные обозначения, как на рисунке 2 и 5

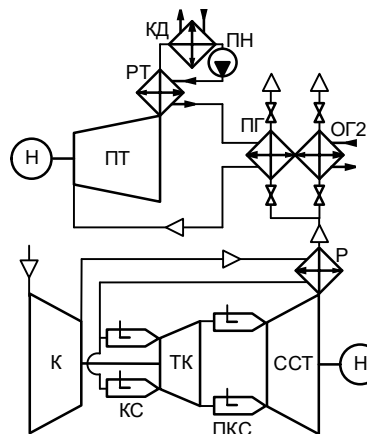
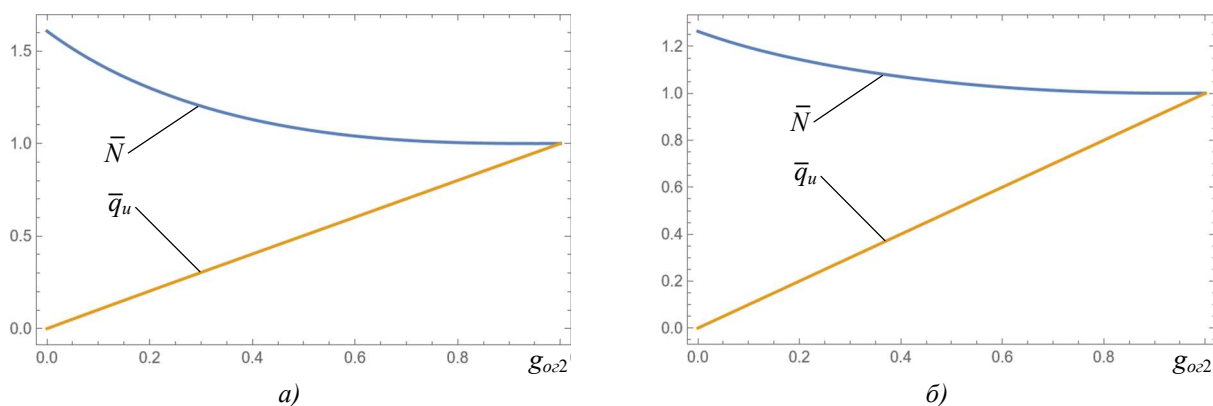


Рисунок 10 – Схема комбинированной МГТУ на базе ПЦ+Р+ПП и ОЦР с регенерацией:  
остальные обозначения, как на рисунке 2 и 6



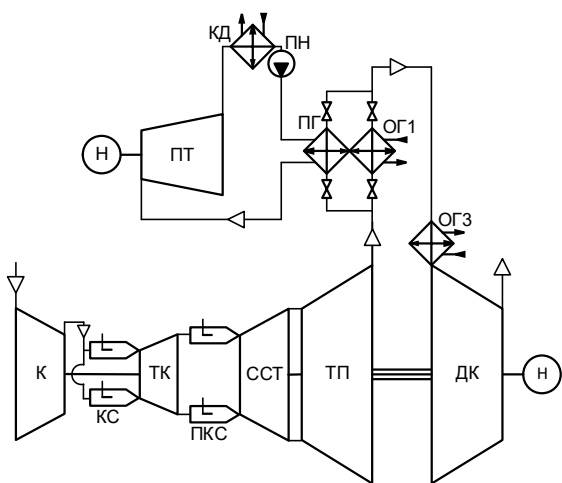
**Рисунок 11 – Зависимость относительных параметров: теплоты ( $\bar{q}_u$ ), переданной на теплоснабжение, и мощности ( $\bar{N}$ ) от относительного расхода газов через охладитель газов для комбинированной МГТУ и установки ОЦР с R-123: а) на базе МГТД ПЦ+ПП; б) на базе МГТД ПЦ+Р+ПП**

Поскольку, как показано выше, температура на входе в парогенератор ниже температуры разложения любого из рассматриваемых хладагентов, то работа, производимая установкой ОЦР, определяется только родом хладагента. Анализ таблицы 6 показывает, что наименее эффективным рабочим телом для установок ОЦР является хладагент R-134a, а самым эффективным – R-123. Полное использование установки ОЦР дает прирост выдаваемой МГТУ мощности на 12...26 % в зависимости от рода хладагента. Так же, как и предыдущая установка, комбинированная МГТУ на базе МГТД ПЦ+Р имеет два независимых газовых выхода, с возможностью плавного перераспределения расхода рабочего тела МГТД, что обеспечивает необходимую гибкость при энергоснабжении объекта.

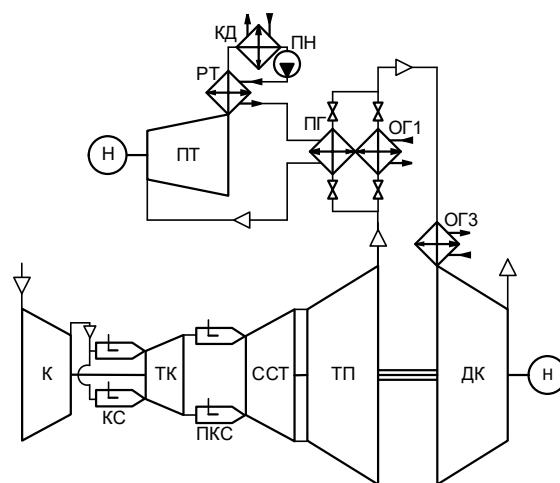
Результаты расчета системы утилизации на переменном режиме работы [23] комбинированной МГТУ, представленной на рисунках 6 и 10, при номинальном режиме МГТД и плавном перераспределении расхода рабочего тела МГТД изображены на рисунках 11а и б.

Схемы комбинированных МГТУ на базе МГТД ПЦ+ТКУ и установкой ОЦР без регенерации и с регенерацией представлены на рисунках 12 и 13 соответственно. Температура газов на выходе из турбины перерасширения (см. таблицу 2) составляет 797 К и для хладагентов R-245fa и R-134a (см. таблицу 4) она превышает температуру разложения.

Установка инжектора перед ПГ в соответствии с (1) создаст не только дополнительные потери давления в выпускном тракте, что уменьшит работу, производимую МГТД, но и увеличит работу дожимающего компрессора, нарушая тем самым работу ТКУ. Поэтому эти два хладагента, учитывая их весьма низкую эффективность в предыдущих схемах, следует исключить из рассмотрения.



**Рисунок 12 – Схема комбинированной МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+ПП и ОЦР без регенерации: остальные обозначения, как на рисунке 3 и 5**



**Рисунок 13 – Схема комбинированной МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+ПП и ОЦР с регенерацией: остальные обозначения, как на рисунке 3 и 6**

Анализ рисунков 12 и 13 показывает, что в отличие от предыдущих схем комбинированных МГТУ, наличие ТКУ предполагает наличие только одного газового выхода. В этом случае ветку, содержащую ПГ, можно рассматривать как байпас ОГ1, что также позволяет осуществлять плавное перераспределение потоков рабочего тела между ними. Это обеспечивает требуемую гибкость при эксплуатации комбинированной МГТУ.

Таблица 7 – Результаты расчетов комбинированной МГТУ на базе МГТД ПЦ+ТКУ+ПП для хладагентов, представленных в таблице 4

Наименование параметра	Ед. изм.	R-717	R-718	R-134a	R-123	R-245fa	R-1233zd
Эффективный КПД МГТУ	%	43,1	45,0	38,2	45,2	41,1	44,5
Температура после ПКС ( $T_{31}$ )	К	1373	1373	1193	1373	1157	1373
Температура газа на входе в ПГ	К	797	797	682	797	659	797
Давление пара на выходе из ПГ	МПа	10	4,5	4	3,6	3,6	3,6
Удельная мощность МГТД	кДж/кг	461	461	367	461	348	461
Удельная мощность на валу ПТ	кДж/кг	91,4	116	35,1	118	66,3	109
Относительный расход топлива в ПКС	кг/кг с.в.	0,53	0,53	0,26	0,53	0,2	0,53

Результаты расчетов комбинированных МГТУ на базе МГТД простого цикла с турбокомпрессорным утилизатором, промежуточным подогревом и установкой ОЦР при  $T_3 = 1373$  К и оптимальном  $\Delta T_1$  представлены в таблице 7.

Анализ таблицы 7 показывает, что использование установки ОЦР дает прирост производимой МГТУ мощности на 10...26 % в зависимости от рода хладагента.

Схемы комбинированных МГТУ на базе МГТД простого цикла с ТКУ и регенерацией теплоты, промежуточным подогревом, и установкой ОЦР без регенерации и с регенерацией представлены на рисунках 14 и 15 соответственно. Поскольку температура газов на выходе из регенератора (см. таблицу 2) для МГТУ на базе МГТД ПЦ+ТКУ+Р+ПП меньше температуры разложения любого из хладагентов, представленных в таблице 4, то для указанных схем возможно использовать их все. Анализ рисунков 14 и 15 показывает, что, аналогично с предыдущими схемами комбинированных МГТУ (см. рис 12 и 13), наличие ТКУ также дает возможность плавного перераспределения расхода рабочего тела МГТД между охладителем газа и утилизационными парогенератором при наличии только одного газового выхода.

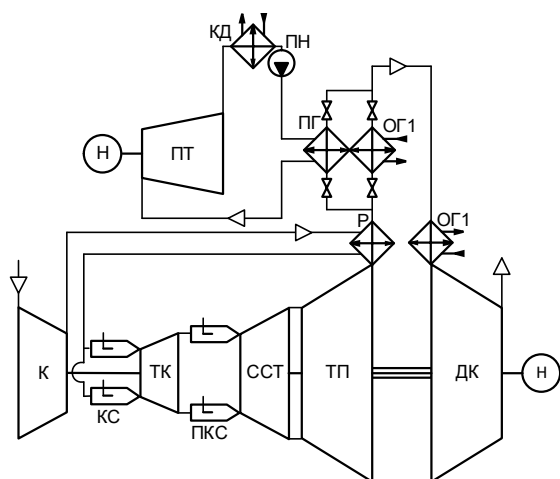


Рисунок 14 – Схема комбинированной МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+Р+ПП и ОЦР без регенерации: остальные обозначения, как на рисунке 4 и 5

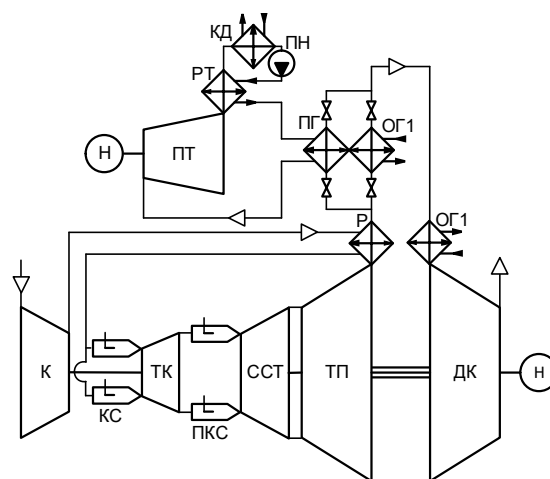


Рисунок 15 – Схема комбинированной МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+Р+ПП и ОЦР с регенерацией: остальные обозначения, как на рисунке 4 и 6

Результаты расчетов комбинированных МГТУ на базе МГТД простого цикла с турбокомпрессорным утилизатором, регенерацией теплоты, промежуточным подогревом рабочего тела, и установкой ОЦР при  $T_3 = T_{31} = 1373$  К и оптимальном  $\Delta T_1$  представлены в таблице 8.



Таблица 8 – Результаты расчетов комбинированной МГТУ на базе МГТД ПЦ+ТКУ+Р+ПП для хладагентов, представленных в таблице 4

Наименование параметра	Ед. изм.	R-717	R-718	R-134a	R-123	R-245fa	R-1233zd
Эффективный КПД МГТУ	%	45,9	44,8	43,7	47,6	46,7	47,1
Давление пара на выходе из ПГ	МПа	10	0,42	4	3,6	3,6	3,6
Удельная мощность на валу ПТ	кДж/кг	38,9	30,8	23,3	50,6	44,5	47,1

Анализ таблицы 8 показывает, что использование установки ОЦР дает прирост выдаваемой МГТУ мощности на 8...18 % в зависимости от рода хладагента. Хотя базовая конфигурация МГТУ обладает наибольшим КПД, следовательно температура на входе в охладитель газа – наименьшая, то соответственно, наименьшим является и прирост мощности, а, соответственно, и КПД комбинации данной МГТУ с установкой ОЦР.

В предложенных выше схемах комбинированных МГТУ с точки зрения гибкости эксплуатации можно выделить два режима:

- с разделяющимся потоком теплоты;
- с переключающимся потоком теплоты.

Наиболее гибкими будет режим МГТУ с разделяющимся потоком теплоты, когда поток теплоты можно разделить между задачами теплоснабжения и дополнительного электроснабжения с помощью установки ОЦР. В этом случае МГТУ смогут отслеживать не только сезонные, но и суточные колебания нагрузки. Режим с переключающимся потоком теплоты ввиду недостаточной гибкости целесообразно использовать установкой теплового бака аккумулятора, который можно наполнять теплом в ночной период при выключенной установке ОЦР, когда потребление электроэнергии снижается.

Для режима с переключающимся потоком теплоты очень важна длительность процесса переключения между охладителем газа и установкой ОЦР, которая зависит от теплоемкости установки ОЦР, большую часть которой составляет теплота фазового перехода рабочего тела. В этом случае наиболее перспективными будут вещества, обладающие наименьшей теплотой фазового перехода. Для приведенных в таблице 4 веществ это – R-123, R-245fa и R-1233zd, как наиболее эффективные и обладающие наименьшим критическим давлением. С точки зрения эффективности (см. таблицу 5-8) и возможности применять регенеративную схему в установке ОЦР предпочтительными оказываются R-123, R-245fa и R-1233zd.

График работы МГТУ с переключающимся потоком теплоты можно представить следующим образом. Летом МГТУ производит только электроэнергию, в том числе для рефустановки, переводя тепловой поток на установку ОЦР, а теплоту производит солнечная водонагревательная установка (СВУ). В зимнее время МГТУ работает в когенерационном режиме, а СВУ в режиме сезонного аккумулирования холода [24]. В межсезонье – в режиме переключения тепловой энергии между установкой ОЦР и охладителем газа в зависимости от потребностей в тепловой и электрической энергии.

### Заключение

Проведенные исследования микрогазотурбинных установок для распределенной энергетики показали:

1. Комбинация простого цикла МГТД+ПП с установкой ОЦР позволяет увеличить удельную мощность, а следовательно и эффективный КПД в 1,38...2 раза, простого цикла с регенерацией и ПП – в 1,12...1,26 раза, простого цикла с ТКУ+ПП в 1,1...1,26 раза и простого цикла с ТКУ, регенерацией и ПП в 1,08...1,18 раза, при этом когенерационные возможности таких установок близки к нулю.

2. Для повышения гибкости комбинированных МГТУ с ПП можно использовать режимы эксплуатации как с разделяющимся потоком теплоты, так и с переключающимся потоком теплоты, дополненные тепловыми аккумуляторами и возобновляемыми источниками энергии.

3. С точки зрения гибкости и эффективности наиболее целесообразно применять комбинированные МГТУ на базе МГТД ПЦ+Р+ПП с регенеративной ОЦР и хладагентом R-123 в качестве рабочего тела. Схемы комбинированных ГТУ на базе ГТД ПЦ+ПП с ОЦР на R-718 целесообразно применять для установок малой средней и большой мощности при больших сезонных и суточных колебаниях нагрузки (см. рисунок 10), т.к. применение воды в качестве рабочего тела требует существенных эксплуатационных расходов. Комбинированные МГТУ на базе МГТД ПЦ+ПП с ОЦР на R-123 рекомендуется применять при больших сезонных и

суточных колебаниях нагрузки (см. рисунок 11).

4. В общем случае при наличии различных локальных объектов с различными потребностями должно быть и определенное количество базовых конфигураций МГТУ, которые путем комбинаций с утилизирующими установками и / или возобновляемыми источниками энергии смогут обеспечить потребности того или иного объекта в теплоте и электроэнергии. Поэтому при подборе конфигураций МГТУ для локальных объектов требуется не самая эффективная установка, а самая сбалансированная по выработке и электроэнергии, и теплоты, чтобы обеспечить минимальный расход топлива.

*Работа выполнена по госбюджетной теме ИПТС «Создание научных основ разработки гибких комбинированных установок с интегрированными возобновляемыми источниками энергии и использованием местных ресурсов холода (FFMM-2024-0018)» (№ госрегистрации 124020100121-6).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гамаюнов С.Н. Перспективные технологии распределенной энергетики в агробизнесе: монография / С.Н. Гамаюнов. Тверь: ООО «Издательство «Триада», 2011. – 160 с.
2. Jaatinen-Värri A, Nerg J, Uusitalo A, et al. Design of a 400 kW Gas Turbine Prototype. ASME. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, Volume 8: Microturbines, Turbochargers and Small Turbomachines; Steam Turbines():V008T23A007. doi:10.1115/GT2016-56444.
3. Кулагин Я.В. Разработка и исследование микро газотурбинных установок для автономного энергоснабжения сельскохозяйственных объектов: дис. канд. техн. наук: 05.20.02 / ФГБНУ ВИЭСХ. Москва, 2015. 135 с.
4. Матвеев В.Т. Глубокая утилизация теплоты в газотурбинных двигателях с турбиной перерасширения / В.Т. Матвеев // Промышленная теплотехника. 1997. Т. 19. № 4-5. С. 81-85.
5. Matviinko V. Variable regimes operation of cogenerative gas -turbine engines with overexpansion turbine/ V.Matviinko, V. Ocheretianiy// Prococoligs of ASME Turbo Expo 2010: Power of Land, Sea and Air GT2010, June 14-18, 2010, Glasgow, UK, GT2010-22029.
6. Matviienko V. Gas Turbine Plant with Overexpansion Turbine and Heat Regeneration in the Ship Propulsion Complex / V. Matviienko, O. Andriets, V. Ochretianjy // Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: June 16-20, 2014, Dusseldorf, Germany.
7. Matviienko V. Working Process Control in a Ship Gas Turbine Engine of Complex Cycle / V/ Matviienko, V. Ocheretianiy // Prococoling of ASME Turbo Expo 2016: June 13-17, 2016, Seoul, South Korea.
8. Diener OF, van der Spuy SJ, von Backström TW, Hildebrandt T. Multi-Disciplinary Optimization of a Mixed-Flow Compressor Impeller. ASME. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, Volume 8: Microturbines, Turbochargers and Small Turbomachines; Steam Turbines: V008T23A021. doi:10.1115/GT2016-57008.
9. Deng, Qing-Hua & Shao, Shuai & Fu, Lei & Luan, Hai-Feng. (2018). An Integrated Design and Optimization Approach for Radial Inflow Turbines – Part I: Automated Preliminary Design. Applied Sciences. 8. 2038. 10.3390/app8112038.
10. Vick, Michael & Young, Trent & Kelly, Matthew & Tuttle, Steven & Hinnant, Katherine. (2016). A Simple Recuperated Ceramic Microturbine: Design Concept, Cycle Analysis, and Recuperator Component Prototype Tests. V008T23A030. 10.1115/GT2016-57780.
11. Литейные жаропрочные сплавы и технология получения монокристаллических лопаток ГТД / Е.Н. Каблов, Н.Г. Орехов, В.Н. Толораия, И.М. Демонис // Технология легких сплавов. 2002. № 4. С. 100-105. EDN TWDMTT.
12. Дологлонян А.В. Оптимизация степени регенерации для циклов микрогазотурбинных установок / А.В. Дологлонян, В.Т. Матвеев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2020. № 3 (341). С. 59-66.
13. M.J. Moore Micro-turbine generators // Professional Engineering. 2002. Printed in the USA. p.263.
14. Барсков, В. В. Выбор параметров и обоснование конструктивной схемы малогабаритной газотурбинной установки с независимым соотношением частот вращения роторов турбины и компрессора: специальность 05.04.12 «Турбомашины и комбинированные турбоустановки»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Барсков Виктор Валентинович. Санкт-Петербург, 2017. 22 с. EDN XBNDQ.
15. Velez F., Segovia J.J., Martin M.C., Antolin G., Chejne F., Quijano A. A technical, economical and market review of organic Rankine cycles for the conversion of low-grade heat for power generation // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012. Vol. 16, no. 6. P. 4175-4189.
16. Quoilin S., Van Den Broekb M., Declaye S., Dewallefa P., Lemorta V. Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013. Vol. 22. P.168-186.
17. Янчошек Л., Кунц П. Органический цикл Ренкина: использование в когенерации // Турбины и дизели. 2012. № 2. С. 50-53.
18. Tchanché B.F., Lambrinos Gr., Frangoudakis A., Papadakis G. Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles – A review of various applications // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2011. Vol.15, iss. 8. P. 3963-3979.
19. [Электронный ресурс]. – 2019. – URL: <https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/> (дата обращения 31.05.19).
20. Дологлонян А.В. Выбор рабочего тела и оптимизация параметров органического цикла Ренкина / А.В.

Дологлонян, В.Т. Матвеевко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2019. № 5 (337). С. 139-151.

21. Дологлонян А.В. Термодинамические характеристики комбинированных циклов микрогазотурбинных двигателей для распределенной энергетики / А.В. Дологлонян, В.Т. Матвеевко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2020. № 4-1 (342). С. 28-41. DOI: 10.33979/2073-7408-2020-342-4-1-28-41.

22. Дологлонян А.В., Матвеевко В.Т., Клименко А.Г. Микрогазотурбинные установки с повышенными термодинамическими характеристиками, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 2 часть 1, С. 117-125. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.013.

23. Дологлонян А.В. Оценка эффективности установок органического цикла Ренкина на частичных нагрузках при работе на различных рабочих телах / А.В. Дологлонян, В.Т. Матвеевко, А.Г. Клименко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2022. № 2 (352). С. 9-18. DOI: 10.33979/2073-7408-2022-352-2-9-18

24. Дологлонян А.В. Исследование потенциала сезонного аккумулирования холода при работе солнечных коллекторов в ночное время / А.В. Дологлонян, А.К. Сухов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2017. – № 5 (325). – С. 172-176.

Дологлонян Андрей Вартазарович  
ФГБНУ Институт природно-  
технических систем Российской  
Федерации, г. Севастополь  
Кандидат технических наук, зав.  
лабораторией  
E-mail: dologlonyan@hotmail.com

Матвеевко Валерий Тимофеевич  
ФГБНУ Институт природно-  
технических систем Российской  
Федерации, г. Севастополь  
Доктор технических наук, гл.  
науч. сотр.  
E-mail: mvt3900@mail.ru

Клименко Александр Георгиевич  
ФГБНУ Институт природно-  
технических систем Российской  
Федерации, г. Севастополь  
ведущ. инженер-исследователь  
E-mail: kag195877@gmail.com

A.V. DOLOGLONYAN, V.T. MATVEENKO, A.G. KLIMENKO

## THERMODYNAMIC CHARACTERISTICS OF FLEXIBLE COMBINED MICROGAS TURBINE PLANTS BASED ON INTERHEATED ENGINES FOR DISTRIBUTED ENERGY

**Abstract.** *The subject of consideration in the article is methods for increasing the complexity of cycles of microgas turbine plants (MGTP) in order to further increase their flexibility and efficiency. The direction of deeper utilization of exhaust gas heat from a basic microgas turbine engine (MGTE) with interheating (IH) of the working fluid has been chosen, turning it into work in an organic Rankine cycle (ORC) installation. It has been established that the efficiency of a combined MGTP with an ORC installation depends on the configuration of the base MGTP, ORC and the type of refrigerant and is higher compared to the basic configuration of the MGTP. For a combined MGTP based on a simple cycle (SC), the efficiency increased by 1.38...2; for more efficient basic configurations of the MGTP, the efficiency increased by 1.08...1.26 times. It is noted that the MGTP based on the MGTE SC with regeneration, IH and ORC installation with R-123 refrigerant is the most universal and efficient, and the MGTP based on the PC with IH and OCR installation can provide the greatest increase in electrical power. It is shown that to increase the flexibility of combined MGTPs, it is possible to use operating modes with both a split heat flow and a switching heat flow, supplemented by thermal accumulators and renewable energy sources.*

**Keywords:** *microgas turbine plant, heat recovery, overexpansion turbine, turbocharger utilizer, organic Rankine cycle, flexibility, cogeneration.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Gamayunov S.N. Perspektivnyye tekhnologii raspredelennoy energetiki v agrobiznese: monografiya / S.N. Gamayunov. Tver: ООО «Издательство «Трида», 2011. 160 s.
2. Jaatinen-Värri A, Nerg J, Uusitalo A, et al. Design of a 400 kW Gas Turbine Prototype. ASME. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, Volume 8: Microturbines, Turbochargers and Small Turbomachines; Steam Turbines(); V008T23A007. doi:10.1115/GT2016-56444.
3. Kulagin YA.V. Razrabotka i issledovanie mikro gazoturbinnnyh ustanovok dlya avtonomnogo energosnabzheniya selskohozyajstvennyh ob"ektov: dis. kand. tekhn. nauk: 05.20.02 / FGBNU VIESKH. Moskva, 2015. 135 s.
4. Matviienko V.T. Glubokaya utilizatsiya teploty v gazoturbinnnyh dvigatelyah s turbinoj pererasshireniya / V.T. Matviienko // Promyshlennaya teplotekhnika. 1997. T. 19. № 4-5. S. 81-85.
5. Matviienko V. Variable regimes operation of cogenerative gas -turbine engines with overexpansion turbine/ V.Matviienko, V. Ocheretianiy// Prococoligs of ASME Turbo Expo 2010: Power of Land, Sea and Air GT2010, June 14-18, 2010, Glasgow, UK, GT2010-22029.
6. Matviienko V. Gas Turbine Plant with Overexpansion Turbine and Heat Regeneration in the Ship Propulsion Complex / V. Matviienko, O. Andriets, V. Ochretianjy // Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: June 16-20, 2014, Dusseldorf, Germany.

7. Matviienko V. Working Process Control in a Ship Gas Turbine Engine of Complex Cycle / V/ Matviienko, V. Ocheretianyi // Proccecoling of ASME Turbo Expo 2016: June 13-17, 2016, Seoul, South Korea.
8. Diener OF, van der Spuy SJ, von Backström TW, Hildebrandt T. Multi-Disciplinary Optimization of a Mixed-Flow Compressor Impeller. ASME. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, *Volume 8: Microturbines, Turbochargers and Small Turbomachines*; *Steam Turbines* ( ):V008T23A021. doi:10.1115/GT2016-57008.
9. Deng, Qing-Hua & Shao, Shuai & Fu, Lei & Luan, Hai-Feng. (2018). An Integrated Design and Optimization Approach for Radial Inflow Turbines – Part I: Automated Preliminary Design. *Applied Sciences*. 8. 2038. 10.3390/app8112038.
10. Vick, Michael & Young, Trent & Kelly, Matthew & Tuttle, Steven & Hinnant, Katherine. (2016). A Simple Recuperated Ceramic Microturbine: Design Concept, Cycle Analysis, and Recuperator Component Prototype Tests. V008T23A030. 10.1115/GT2016-57780.
11. Litejnye zharoprochnye splavy i tekhnologiya polucheniya monokristallicheskih lopatok GTD / E.N. Kablov, N.G. Orekhov, V.N. Toloraiya, I.M. Demonis // *Tekhnologiya legkih splavov*. 2002. № 4. S. 100-105. EDN TWDMTT.
12. Dologlonyan A.V. Optimizaciya stepeni regeneracii dlya ciklov mikrogazoturbinnih ustanovok / A.V. Dologlonyan, V.T. Matveenko // *Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*. Orel: OGU im. I.S. Turgeneva, 2020. № 3 (341). S. 59-66.
13. M.J. Moore Micro-turbine generators // *Professional Engineering*. 2002. Printed in the USA. p.263.
14. Barskov, V. V. Vybora parametrov i obosnovanie konstruktivnoj skhemy malogabaritnoj gazoturbinnoy ustanovki s nezavisimym sootnosheniem chastot vrashcheniya rotorov turbiny i kompressora: specialnost 05.04.12 «Turbomashiny i kombinirovannye turbostanovki»: avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk / Barskov Viktor Valentinovich. Sankt-Peterburg, 2017. 22 s. EDN XBNDDQ.
15. Velez F., Segovia J.J., Martin M.C., Antolin G., Chejne F., Quijano A. A technical, economical and market review of organic Rankine cycles for the conversion of low-grade heat for power generation // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. Vol. 16, no. 6. P. 4175-4189.
16. Quoilin S., Van Den Broekb M., Declayea S., Dewallefa P., Lemorta V. Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. Vol. 22. P.168-186.
17. Yanchoshek L., Kunc P. Organicheskij cikl Renkina: ispolzovanie v kogeneracii // *Turbiny i dizeli*. 2012. № 2. S. 50-53.
18. Tchanche B.F., Lambrinos Gr., Frangoudakis A., Papadakis G. Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles – A review of various applications // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011. Vol.15, iss. 8. P. 3963-3979.
19. [Electronic resource]. – 2019. – URL: [http://neochemical.ru/File/DOWTHERM\\_A\\_TDS\\_Russian.pdf/](http://neochemical.ru/File/DOWTHERM_A_TDS_Russian.pdf/) (accessed 05.31.19).
20. Dologlonyan A.V. Vybora rabocheho tela i optimizaciya parametrov organicheskogo cikla Renkina / A.V. Dologlonyan, V.T. Matveenko // *Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*. Orel: OGU im. I.S. Turgeneva, 2019. № 5 (337). S. 139-151.
21. Dologlonyan A.V. Termodinamicheskie karakteristiki kombinirovannykh ciklov mikrogazoturbinnih dvigatelej dlya raspredelennoj energetiki / A.V. Dologlonyan, V.T. Matveenko // *Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*. Orel: OGU im. I.S. Turgeneva, 2020. № 4-1 (342). S. 28-41. DOI: 10.33979/2073-7408-2020-342-4-1-28-41.
22. Dologlonyan A.V., Matveenko V.T., Klimenko A.G. Mikrogazoturbinnye ustanovki s povyshennymi termodinamicheskimi karakteristikami, Morskie intellektualnye tekhnologii. 2024. № 2 chast 1, S. 117-125. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.013.
23. Dologlonyan A.V. Ocenka effektivnosti ustanovok organicheskogo cikla Renkina na chastichnykh nagruzkah pri rabote na razlichnykh rabochih telah / A.V. Dologlonyan, V.T. Matveenko, A.G. Klimenko // *Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*. Orel: OGU im. I.S. Turgeneva, 2022. № 2 (352). S. 9-18. DOI: 10.33979/2073-7408-2022-352-2-9-18
24. Dologlonyan A.V. Issledovanie potentsiala sezonnogo akumulirovaniya holoda pri rabote solnechnykh kollektorov v nochnoe vremya / A.V. Dologlonyan, A.K. Suhov // *Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*. Orel: OGU im. I.S. Turgeneva, 2017. № 5 (325). S. 172-176.

**Dologlonyan Andrey Vartazarovich**  
 FSBSI Institute of nature and technical systems,  
 Russian Federation, Sevastopol  
 Candidate of Technical Sciences,  
 Chief of Laboratory,  
 E-mail: [dologlonyan@hotmail.com](mailto:dologlonyan@hotmail.com)

**Matviienko Valerii Timofeevich**  
 FSBSI Institute of nature and technical systems,  
 Russian Federation, Sevastopol  
 Doctor of Technical Sciences,  
 Chief Researcher  
 E-mail: [mvt3900@mail.ru](mailto:mvt3900@mail.ru)

**Klimenko Alexander Georgievich**  
 FSBSI Institute of nature and technical systems,  
 Russian Federation, Sevastopol  
 Leading Research Engineer  
 E-mail: [kag195877@gmail.com](mailto:kag195877@gmail.com)

© А.В. Дологлonyaн, В.Т. Матвеенко, А.Г. Клименко, 2024

К.Ю. КАНДУРОВА, А.В. МАМОШИН, Е.В. ПОТАПОВА

## ВОЗМОЖНОСТИ ФЛУОРЕСЦЕНТНО-ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ПЕЧЕНИ ПАЦИЕНТОВ С МЕХАНИЧЕСКОЙ ЖЕЛТУХОЙ

**Аннотация.** Статья посвящена анализу возможности применения методов флуоресцентной спектроскопии и спектроскопии диффузного отражения для оценки функционального состояния печени пациентов с синдромом механической желтухи. Проведен набор данных в условиях клиники с помощью разработанной мультимодальной установки флуоресцентно-отражательной спектроскопии со специальным волоконно-оптическим зондом во время антеградной декомпрессии желчных протоков под ультразвуковым и рентгенологическим контролем. По спектрам рассчитаны параметры, характеризующие вклад основных флуорофоров паренхимы печени, а также тканевая сатурация. С помощью метода линейного дискриминантного анализа предложены классификаторы, позволяющие прогнозировать положительную или отрицательную динамику течения послеоперационного периода пациентов, с чувствительностью и специфичностью не менее 85% и 89%, соответственно. Полученные результаты перспективны для разработки метода диагностики функционального состояния печени при механической желтухе, предоставляющего дополнительную диагностическую информацию и позволяющего прогнозировать тяжесть состояния пациентов в послеоперационном периоде билиарной декомпрессии.

**Ключевые слова:** печень, механическая желтуха, печеночная недостаточность, флуоресцентная спектроскопия, спектроскопия диффузного отражения.

### Введение

В абдоминальной хирургии актуальными остаются вопросы, связанные с лечением заболеваний, осложненных обструкцией желчевыводящих путей. В результате обтурации желчевыводящей системы и нарушения оттока желчи, преимущественно из-за желчнокаменной болезни или роста злокачественных опухолей, развивается синдром механической желтухи (МЖ). Данное состояние приводит к частичному или полному нарушению функций печени – печеночной недостаточности (ПН), прогрессирование которой ухудшает состояние всего организма и может привести к летальному исходу [1,2].

В настоящее время лечение пациентов с МЖ преимущественно осуществляется в два этапа, первым из которых является как можно более ранняя декомпрессия билиарного тракта, направленная на купирование МЖ и связанных с ней осложнений. Одним из вариантов выполнения первого этапа хирургического лечения является антеградная декомпрессия желчных протоков. Однако, по сведениям литературных источников не всегда чрескожные минимально инвазивные вмешательства приводят к стабилизации состояния пациентов [3–6], что может быть обусловлено тяжелым нарушением функционального состояния печени на момент проведения оперативного вмешательства.

С целью прогнозирования течения послеоперационного периода и планирования дальнейшей хирургической тактики врачу важно иметь представление о степени выраженности изменений, происходящих в паренхиме печени вследствие развития ПН [2]. В текущей клинической практике для оценки функционального состояния печени врачу-хирургу доступен ряд лабораторных и инструментальных методов диагностики. Тем не менее, несмотря на высокий уровень и большое количество современных методов, определение степени и прогнозирование течения ПН в ходе лечения МЖ, остается сложной задачей. Существующие инструменты оценки функционального состояния печени не являются специфичными для синдрома МЖ и дают косвенные результаты. Сохраняется актуальность поиска дополнительных объективных критериев для своевременной оценки и прогнозирования прогрессирования ПН при МЖ, а также разработки относительно простой и быстрой технологии прямой объективной оценки функционального состояния печени для использования в клинической практике.

Среди современных инструментальных методов актуальным направлением разработки являются оптические методы диагностики, зарекомендовавшие себя во многих областях [7–13], в том числе в хирургии [14–16]. Преимущества оптических технологий связаны с низкой стоимостью процедуры, высокой скоростью, производительностью и безопасностью. Спектроскопические методы основаны на различных видах взаимодействия оптического излучения с биологическими тканями, которые способны дать врачу дополнительную информацию о метаболических и структурных изменениях в биологических тканях. Данные методы также могут быть внедрены в стандартные хирургические инструменты с помощью волоконно-оптических зондов [14,17–19].

Одним из наиболее распространенных методов для оценки метаболических и структурных изменений является флуоресцентная спектроскопия (ФС). ФС основана на освещении ткани монохроматическим световым излучением УФ или видимого диапазона и последующей регистрации спектров экзогенной или эндогенной флуоресценции [16]. Биологические ткани содержат ряд эндогенных биомаркеров – флуорофоров, выполняющих определенные роли в биохимических процессах и обладающих специфическими диапазонами возбуждения и эмиссии флуоресценции [12,20]. Оценивая изменения вкладов отдельных флуорофоров, можно более точно определить характер и степень метаболических и структурных изменений тканей и, таким образом, использовать их в качестве критериев для *in vivo* диагностики [21,22].

Другим распространенным методом является спектроскопия диффузного отражения (СДО). В основе СДО лежит явление диффузного отражения, возникающего в результате взаимодействия света в широком видимом или ближнем ИК диапазоне со структурами биологической ткани. Ткани содержат ряд хромофоров (окси-, дезоксигемоглобин, вода, жиры и др.), концентрация и пространственное распределение которых обуславливает рассеяние и поглощение света, что может быть использовано для количественного определения их содержания [23]. Поглощение света отражает химический состав, а рассеяние – морфологическую структуру ткани. Данные процессы определяют процент диффузно отраженного света. Для интерпретации результатов СДО вычисляются индексы содержания хромофоров, тканевая сатурация и т.д. [24,25].

Таким образом, использование методов ФС и СДО, позволяющих получить информацию о метаболических и структурных изменениях в биологических тканях *in vivo*, представляется возможным как одно из направлений повышения информативности существующих диагностических алгоритмов определения функционального состояния печени у пациентов с синдромом МЖ. Совершенствование диагностических алгоритмов, включением в них оптических технологий, направлено на повышение качества лечения, под которым понимается оптимизация сроков диагностики и сокращение длительности госпитализации, а затрат ресурсов лечебного учреждения за счет выбора персонализированной лечебной тактики на как можно более раннем этапе, исходя из состояния пациента.

Таким образом, целью данной работы явилось выявление новых диагностических критериев функционального состояния печени для прогнозирования динамики состояния пациентов с синдромом МЖ после антеградной билиарной декомпрессии на основе методов ФС и СДО.

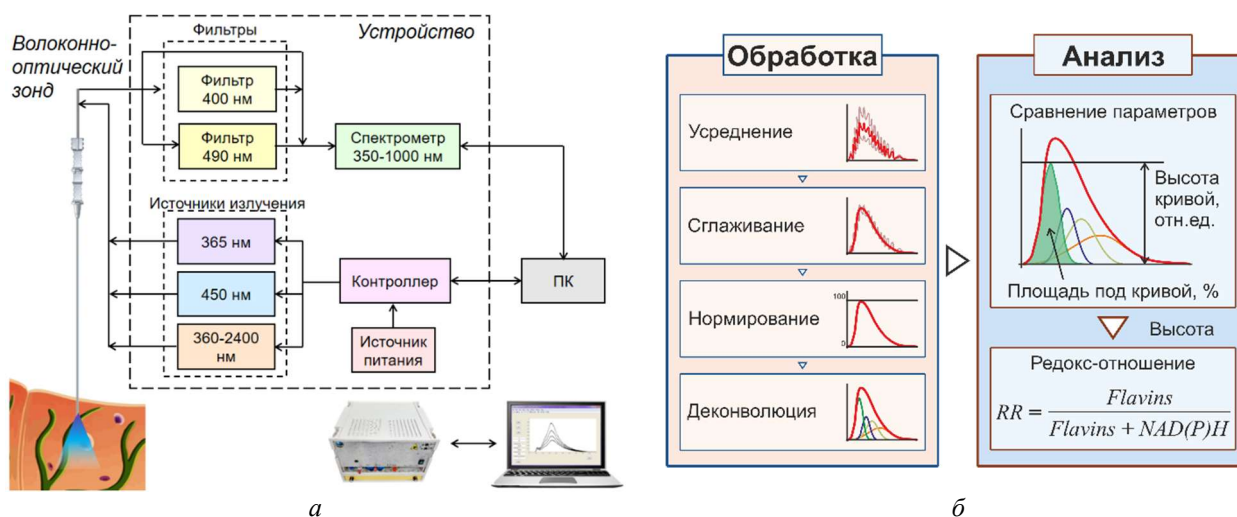
### Материалы и методы

Исследование было одобрено Этическим комитетом Орловского государственного университета (протокол заседания № 14 от 24.01.2019) и проводилось на базе отделения рентгенохирургических методов диагностики и лечения Орловской областной клинической больницы (г. Орел, Россия).

Измерения проводились с помощью специально разработанной установки для оптической биопсии (рисунок 1а). В качестве источников монохроматического излучения использовались светодиод 365 нм и лазерный диод 450 нм. Мощность излучения на торце волоконно-оптического зонда не превышала 0,2 мВт по требованиям безопасности [26,27]. В качестве источника в канале СДО использовался широкополосный источник HL-2000-FHSA

(Ocean Optics, США) 360-2400 нм. Спектры регистрировали с помощью ПЗС-спектрометра FLAME T-VIS-NIR-ES (Ocean Optics, США) в диапазоне 350-1000 нм после ослабления обратного рассеянного излучения от источников фильтрами FGL400 и FGL495 (Thorlabs Inc., США). Оптическое излучение доставлялось с помощью специально разработанного волоконно-оптического зонда диаметром 1 мм.

Исследование проводилось в два этапа: 1) выбор информативных признаков в канале ФС; 2) построение классификатора.



**Рисунок 1 – Протокол эксперимента:**

*а – схема установки ФС и СДО; алгоритм обработки спектров флуоресценции*

В первом этапе исследования приняли участие 20 пациентов ( $64 \pm 13$  лет) с диагнозом МЖ. Оптические измерения проводились во время формирования чрескожного доступа при антеградной декомпрессии желчевыводящих путей под ультразвуковым и рентгенологическим контролем. Поскольку для формирования контрольной группы исследуемых без синдрома МЖ невозможно провести оптические измерения паренхимы печени здоровых добровольцев, были частично использованы данные, полученные ранее в исследованиях по применению оптической биопсии методами ФС и СДО для диагностических исследований у пациентов с новообразованиями печени [14]. В этой части исследований приняли участие пациенты со злокачественными новообразованиями печени, у которых оптические измерения проводились во время стандартной процедуры пункционной биопсии. Спектры флуоресценции регистрировались по ходу движения пункционной иглы и волоконно-оптического зонда в тканях печени, не пораженных злокачественным процессом. В группу сравнения вошли данные 11 пациентов без синдрома МЖ. Таким образом, представилось возможным провести сравнение результатов оптических измерений паренхимы печени при наличии и отсутствии синдрома МЖ.

Полученные спектры флуоресценции анализировались с помощью программного обеспечения OriginPro 2021 (рисунок 1б). Усредненные спектры флуоресценции были сглажены фильтром Савицкого-Голая и нормированы от 0 до 100. Следующий этап обработки включал нелинейную процедуру деконволюции на основе алгоритма Левенберга-Марквардта для вычисления комбинаций гауссовых кривых, отражающих вклад отдельных флуорофоров в общий сигнал, полученный от ткани печени. Количество кривых, их центральные длины волн и значения полуширины были первоначально выбраны из литературных данных о флуорофорах паренхимы печени, а затем скорректированы эмпирически, чтобы обеспечить как можно лучшее соответствие измеренным спектрам [21,22,28,29]. Статистическая значимость различий между параметрами проверялась с помощью непараметрического U-теста Манна-Уитни в связи с ограниченным размером выборки и отсутствием подтвержденного нормального распределения результатов.

Также для интерпретации изменений в метаболическом состоянии паренхимы печени дополнительно было рассчитано редокс-отношение с помощью одного из распространенных подходов к его оценке, выраженное в формуле [28,30]:

$$RR = \frac{Flavins}{NAD(P)H + Flavins} \cdot 6 \quad (1)$$

где  $RR$  – редокс-отношение;

$Flavins$  – высота кривой, относящейся к флуоресценции флавинов в спектрах, возбужденных на длине волны 450 нм;

$NAD(P)H$  – высота кривой, относящейся к флуоресценции НАД(Ф)Н в спектрах, возбужденных на длине волны 365 нм.

На втором этапе исследований для построения модели классификации и выявления признаков, наилучшим образом разделяющих объекты по предполагаемой положительной или отрицательной динамике состояния после билиарной декомпрессии, был применён подход, основанный на линейном дискриминантном анализе (ЛДА).

Для классификации была использована выборка из данных 40 пациентов ( $66 \pm 13$  лет) с синдромом МЖ различной этиологии и тяжести состояния. На основании данных лабораторных (биохимический анализ крови) и инструментальных методов исследований, наблюдений в ходе лечения и заключения лечащего врача, пациенты были ретроспективно разделены на группы в зависимости от динамики (положительная или отрицательная) их состояния после первичной антеградной декомпрессии желчевыводящих путей (таблица 1). Анализируемые параметры включали в себя: высоты и площади гауссовых кривых выбранных флуорофоров, площади под кривой спектра флуоресценции в нескольких диапазонах, тканевую сатурацию.

При анализе данных СДО спектр отраженного от биологической ткани излучения нормировался на референсный спектр, регистрируемый при освещении эталона диффузного отражения эталона с известной отражательной способностью тем же источником, который используется в оптических измерениях паренхимы печени. Для расчета тканевой сатурации использовали коэффициенты отражения, зарегистрированные в изобестической (805 нм) и неизобестической (760 нм) точках спектров поглощения ИК излучения окси- и дезоксигемоглобином [24]:

$$SO_2 = \frac{\mu_{Hb}(\lambda_1) - \mu_{Hb}(\lambda_2) \cdot \frac{R(\lambda_2)}{R(\lambda_1)}}{\mu_{Hb}(\lambda_1) - \mu_{HbO_2}(\lambda_1)} \quad (2)$$

где  $R(\lambda)$  – коэффициент диффузного отражения на выбранной длине волны;

$\mu_{Hb}$  и  $\mu_{HbO_2}$  – коэффициенты поглощения дезоксигенированной и осигенированной крови, соответственно;

$\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – длина волны неизобестической и изобестической точек, соответственно.

Результатом ЛДА являлась дискриминантная функция, которая должна обеспечивать высокую чувствительность и специфичность и допустимый уровень ошибки 1 рода (вероятности ложноотрицательного результата). Вид дискриминантной функции:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n a_i x_i + c \quad (3)$$

где  $X = (x_1, \dots, x_n)$  – вектор значений дискриминантных переменных;

$a = (a_1, \dots, a_n)$  – вектор коэффициентов дискриминантной функции;

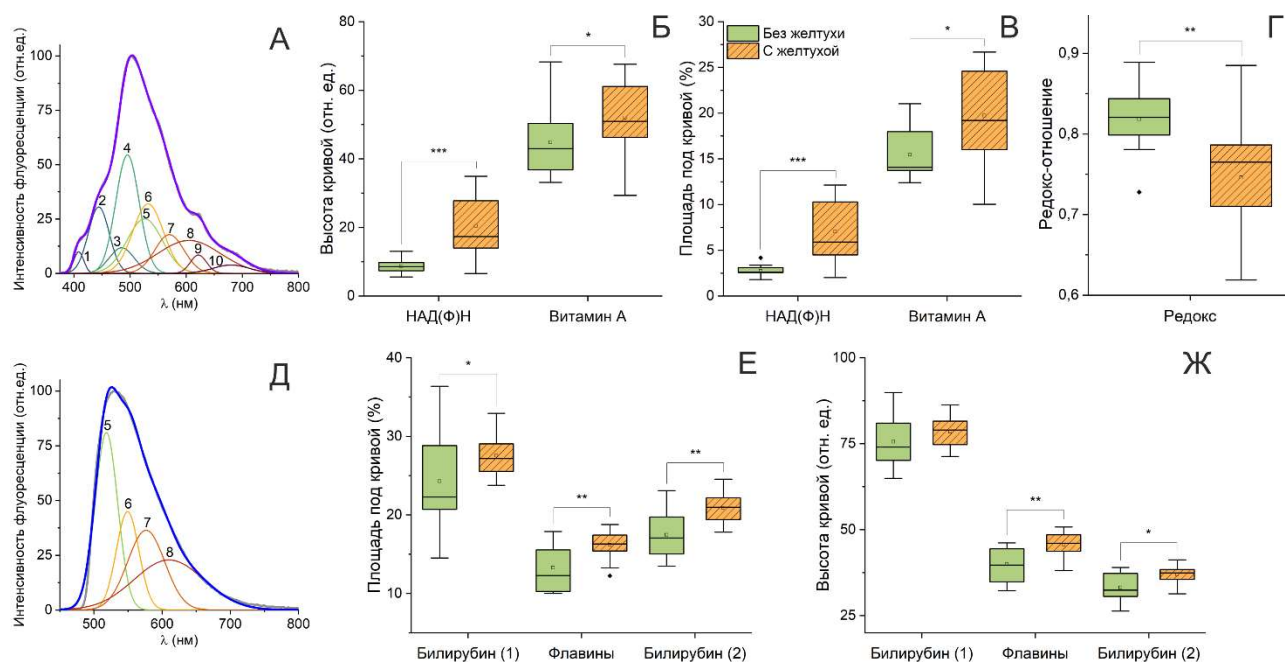
$n$  – количество рассматриваемых переменных;

$c$  – свободный член (константа).

### Результаты и обсуждение

В спектрах флуоресценции были выделены гауссовы кривые, относящиеся к флуоресценции следующих веществ (рисунок 2а,д): коллаген и эластин (кривая 1), НАД(Ф)Н (2) – совместно обозначаемые восстановленные формы никотинамидадениндинуклеотида (НАДН) и никотинамидадениндинуклеотидфосфата (НАД(Ф)Н), свободные жирные кислоты (3), витамин А (4), билирубин (5, 7), флавины (6), липофусцин (8), порфирины (9, 10). Анализируемые параметры включали высоту пиков, площади под гауссовыми кривыми и их относительный вклад в общие площади спектров флуоресценции.





**Рисунок 2 – Результаты анализа данных ФС:**

*а, д – деconvolution спектров для длины волны возбуждения 365 нм и 450 нм, соответственно; б, е – процент площади под гауссовыми кривыми флуорофоров в общей площади под кривой спектра флуоресценции для длины волны возбуждения 365 нм и 450 нм, соответственно; в, ж – высота гауссовых кривых для длины волны возбуждения 365 нм и 450 нм, соответственно; г – редокс-отношение*

Результаты (рисунок 2) показали статистически значимое увеличение вклада кривых, отражающих флуоресценцию НАД(Ф)Н, билирубина и флавинов в группе пациентов с МЖ, а также снижение редокс-отношения. Увеличение содержания билирубина в паренхиме печени приводит к нарушениям процессов окислительного фосфорилирования и системы антиоксидантной защиты, снижению биоэнергетических процессов в митохондриях гепатоцитов. Преобладание НАД(Ф)Н может указывать на нарушение утилизации кислорода, что приводит к тяжелой гипоксии и последующему повреждению гепатоцитов. На изменения в скорости и реакциях метаболизма гепатоцитов, вызванные гипоксией, также указывают рассчитанные редокс-соотношения в паренхиме печени пациентов с МЖ и без данного синдрома.

В дополнение к рассмотренным флуорофорам были обнаружены статистически значимые различия во вкладе флуоресценции витамина А. Паренхима печени в нормальном состоянии характеризуется значительным содержанием витамина А, поэтому нарушение нормального функционирования печени, в том числе из-за МЖ, также влияет на функцию хранения и транспорта этого вещества из печени. Также отмечается, что развитие и степень патологических процессов могут отражаться по значительному вкладу в спектры флуоресценции кривых липофусцина и наблюдаемому в отдельных случаях повышению флуоресценции порфиринов.

Проведенные исследования позволили выделить пары параметров, полученные как методами ФС и СДО, так и методом ФС на разных длинах волн возбуждения флуоресценции и перспективные для дальнейшей разработки классификатора, а также метода оценки функционального состояния печени. Для разработки диагностического критерия был произведен расчёт вектора коэффициентов дискриминантной функции и её свободного члена для каждой из комбинаций дискриминантных коэффициентов, определён вид дискриминантной функции. Анализируемые параметры включали в себя высоты и площади гауссовых кривых, площади под кривой спектра в нескольких диапазонах, тканевую сатурацию.

В таблице 1 представлены результаты проведенного ЛДА для разделения исследовательских данных на две группы (пациенты с положительной и отрицательной динамикой состояния после билиарной декомпрессии) для пар дискриминантных переменных с наиболее высокими показателями точности.

Таблица 1 – Значения чувствительности и специфичности для полученных дискриминантных функций

Параметр	Дискриминантные переменные			
	Тканевая сатурация $StO_2$	Площадь, 365 нм, билирубин 2 $A_{365 \text{ нм}}^{\text{билирубин 2}}$	Высота, 365 нм, билирубин 2 $H_{365 \text{ нм}}^{\text{билирубин 2}}$	Высота, 365 нм, билирубин 2 $H_{365 \text{ нм}}^{\text{билирубин 2}}$
	Площадь, 450 нм, 565-600 нм $A_{565-600 \text{ нм}}^{450 \text{ нм}}$	Площадь, 450 нм, билирубин 1 $A_{450 \text{ нм}}^{\text{билирубин 1}}$	Площадь, 450 нм, билирубин 1 $A_{450 \text{ нм}}^{\text{билирубин 1}}$	Площадь, 450 нм, липофусцин $A_{450 \text{ нм}}^{\text{липофусцин}}$
Чувствительность	0,85	0,88	0,88	0,88
Специфичность	0,91	0,90	0,90	0,89
Точность	0,89	0,89	0,89	0,89
Площадь под кривой чувствительности-специфичности	0,94	0,91	0,90	0,89

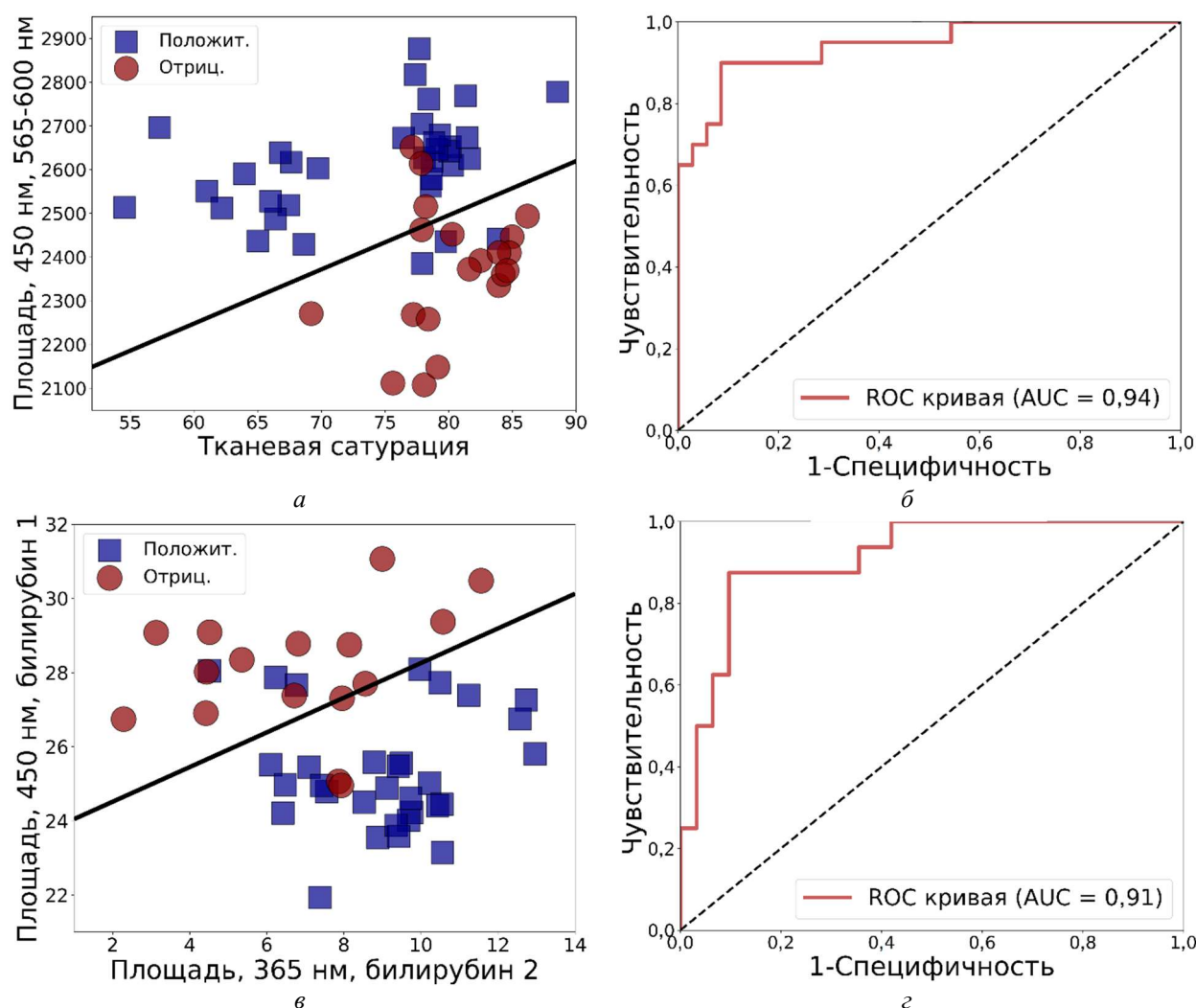


Рисунок 3 – Результаты ЛДА:

а, в – диаграмма рассеяния значений выбранных параметров; б, г – ROC кривая для оценки эффективности соответствующих моделей классификации

С точки зрения достижения наибольшей чувствительности и специфичности для всех используемых методов в качестве наиболее приемлемых были выбраны дискриминантные

функции с применением в качестве дискриминантных переменных значений тканевой сатурации  $StO_2$  и площади  $A_{565-600\text{ нм}}^{450\text{ нм}}$ , площадей гауссовых кривых  $A_{\text{билирубин 2}}^{365\text{ нм}}$  и  $A_{\text{билирубин 1}}^{450\text{ нм}}$ . На основании наиболее высоких значений показателей чувствительности и специфичности итоговые модели классификации на основе сочетаний параметров, полученных методами ФС и СДО, ФС на длинах волны 365 нм и 450 нм, имеют вид:

$$f_1(x) = 0,22 \cdot StO_2 - 0,02 \cdot A_{565-600\text{ нм}}^{450\text{ нм}} + 27,22; \quad (4)$$

$$f_2(x) = -0,53 \cdot A_{\text{билирубин 2}}^{365\text{ нм}} + 1,13 \cdot A_{\text{билирубин 1}}^{450\text{ нм}} - 26,56. \quad (5)$$

На рисунке 3 представлены результаты ЛДА для двух пар параметров в виде графика рассеяния параметров, рассчитанных по экспериментальным данным методов ФС и СДО, с нанесением дискриминантных линий, которые делят экспериментальные точки на две группы. Если полученная экспериментальная точка лежит на плоскости выше дискриминантной линии  $f_1$  или ниже линии  $f_2$ , то делается вывод о том, что у данного пациента после билиарной декомпрессии будет наблюдаться положительная динамика состояния, при положении экспериментальной точки ниже линии  $f_1$  или выше линии  $f_2$  – о том, что у пациента в послеоперационном периоде будет наблюдаться отрицательная динамика. Выбор сочетания двух параметров, получаемых разными методами, обусловлен предоставлением возможности врачу-хирургу одновременной оценки разных сторон функционального состояния паренхимы печени, исходя из индивидуальных особенностей пациента, а также случаями, когда регистрация данных одним из каналов будет затруднена. Непосредственным диагностическим критерием является модель классификации в виде дискриминантной функции, позволяющая классифицировать наличие или отсутствие отрицательной динамики состояния пациентов после билиарной декомпрессии.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что применение методов ФС и СДО позволяет синтезировать решающие правила для выявления пациентов с положительной и отрицательной динамикой лечения после билиарной декомпрессии с уровнем ошибки первого рода менее 0,2.

### Заключение

В настоящее время актуальной тенденцией биомедицинского приборостроения является внедрение оптических технологий в рутинную клиническую практику за счет широких возможностей по быстрой и прямой оценке состояния биологических тканей. Представленные в работе результаты показали возможности применения методов ФС и СДО в рамках минимально инвазивных хирургических вмешательств – антеградной декомпрессии желчевыводящих путей под ультразвуковым и рентгенологическим контролем при синдроме МЖ.

Подход к оценке вкладов тканевых флуорофоров по параметрам гауссовых кривых и площадей участков спектров флуоресценции показал чувствительность как к различиям в функциональном состоянии печени при наличии и отсутствии синдрома МЖ, так и к тяжести состояния внутри группы пациентов с МЖ. Применение совместно с методом ФС оценки тканевой сатурации по спектрам СДО позволило разработать классификаторы, достигающие уровня чувствительности не менее 85%, специфичности – не менее 90%.

Полученные в статье результаты будут использованы для разработки метода оценки функционального состояния печени у пациентов с синдромом МЖ различной этиологии и тяжести состояния, основанного на регистрации параметров флуоресценции и диффузного отражения *in vivo* в рамках мультимодального подхода в одном устройстве с волоконно-оптическим зондом. Предложенные критерии также являются перспективными для более точной классификации пациентов с отрицательной динамикой состояния после билиарной декомпрессии и выявления прогностически тяжелых состояний, для чего продолжается набор исследовательских данных.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 23-25-00487, <https://rscf.ru/en/project/23-25-00487>.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pavlidis, E.T. Pathophysiological consequences of obstructive jaundice and perioperative management / E.T. Pavlidis, T.E. Pavlidis // *Hepatobiliary Pancreat. Dis. Int.* – 2018. – 17(1). – P. 17-21.
2. Lukmonov, S. Minimally invasive biliary decompression methods in management of obstructive jaundice of malignant etiology / S. Lukmonov // *HPB.* – 2018. – 20. – P. S730.
3. Moole, H. Efficacy of preoperative biliary drainage in malignant obstructive jaundice: a meta-analysis and

- systematic review / H. Moole, M. Bechtold, S.R. Puli // *World J. Surg. Oncol.* – 2018. – 14(1). – P. 1-11.
4. Shaib, Y. Preoperative biliary drainage for malignant biliary obstruction: results from a national database / Y. Shaib, M.A. Rahal, M.O. Rammal, A. Mailhac, H. Tamim // *J. Hepato-Biliary-Pancreatic Sci.* – 2017. – 24(11). – P. 637-642.
5. Galperin, E.I. Obstructive jaundice—a “false stable” condition, consequences of a “second hit”, management principles / E.I. Galperin // *Ann. khirurgicheskoy gepatologii* = *Ann. HPB Surg.* – 2011. – 16(3). – P. 16-25.
6. Барванян, Г.М. Выбор способа хирургической декомпрессии желчных путей при нерезектабельных опухолях билиопанкреатодуоденальной зоны / Г.М. Барванян // *Анналы хирургической гепатологии.* – 2016. – 21(4). – P. 55-62.
7. Croce, A.C. Autofluorescence spectroscopy and imaging: A tool for biomedical research and diagnosis / A.C. Croce, G. Bottiroli // *Eur. J. Histochem.* – 2014. – 58(4). – P. 320-337.
8. Dunaev, A.V. Individual variability analysis of fluorescence parameters measured in skin with different levels of nutritive blood flow / A.V. Dunaev, V.V. Dremine, E.A. Zherebtsov, I.E. Rafailov, K.S. Litvinova, S.G. Palmer, N.A. Stewart, S.G. Sokolovski, E.U. Rafailov // *Med. Eng. Phys.* – 2017. – 37(6). – P. 574-583.
9. Жеребцов, Е.А. Флуоресцентная диагностика митохондриальной функции в эпителиальных тканях in vivo: монография / Е.А. Жеребцов, В.В. Дрёмин, А.И. Жеребцова, Е.В. Потапова, А.В. Дунаев. – Орёл: ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», 2018. – 107 с.
10. Дунаев, А.В. Мультимодальная оптическая диагностика микроциркуляторно-тканевых систем организма человека: монография / А.В. Дунаев. – Старый Оскол: ТНТ, 2022. – 440 с.
11. Kim, J.A. Optical spectroscopy for in vivo medical diagnosis—a review of the state of the art and future perspectives / J.A. Kim, D.J. Wales, G.-Z. Yang // *Prog. Biomed. Eng.* – 2020. – 2(4). – P. 42001.
12. Shrirao, A.B. Autofluorescence of blood and its application in biomedical and clinical research / A.B. Shrirao, R.S. Schloss, Z. Fritz, M.V. Shrirao, R. Rosen, M.L. Yarmush // *Biotechnol. Bioeng.* – 2021. – 118(12). – P. 4550-4576.
13. He, Z. Novel endoscopic optical diagnostic technologies in medical trial research: recent advancements and future prospects / Z. He, P. Wang, X. Ye // *Biomed. Eng. Online.* – 2021. – 20(1). – P. 1-38.
14. Dremine, V. Optical percutaneous needle biopsy of the liver: a pilot animal and clinical study / V. Dremine, E. Potapova, E. Zherebtsov, K. Kandurova, V. Shupletsov, A. Alekseyev, A. Mamoshin, A. Dunaev // *Sci. Rep.* – 2020. – 10(1). – P. 14200.
15. Zherebtsov, E.A. Fluorescence lifetime needle optical biopsy discriminates hepatocellular carcinoma / E.A. Zherebtsov, E.V. Potapova, A.V. Mamoshin, V.V. Shupletsov, K.Y. Kandurova, V.V. Dremine, A.Y. Abramov, A.V. Dunaev // *Biomed. Opt. Express.* – 2022. – 13(2). – P. 633-646.
16. Alfano, R. Optical biopsy for cancer detection / R. Alfano, Y. Pu // *Lasers for Medical Applications.* – Woodhead Publishing, 2013. – P. 325-367.
17. Spliethoff, J.W. In vivo characterization of colorectal metastases in human liver using diffuse reflectance spectroscopy: Toward guidance in oncological procedures / J.W. Spliethoff, L.L. de Boer, M.A. Meier, W. Prevoo, J. de Jong, K. Kuhlmann, T.M. Bydlon, H.J. Sterenborg, B.H. Hendriks, T.J. Ruers // *J. Biomed. Opt.* – 2016. – 21(9). – P. 97004.
18. Braun, F. A customized multispectral needle probe combined with a virtual photometric setup for in vivo detection of Lewis lung carcinoma in an animal model / F. Braun, R. Schalk, M. Nachtmann, A. Hien, R. Frank, T. Beuermann, F.-J. Methner, B. Kränzlin, M. Rädle, N. Gretz // *Meas. Sci. Technol.* – 2019. – 30(10). – P. 104001.
19. Kandurova, K. Fiber-optic system for intraoperative study of abdominal organs during minimally invasive surgical interventions / K. Kandurova, V. Dremine, E. Zherebtsov, E. Potapova, A. Alyanov, A. Mamoshin, Y. Ivanov, A. Borsukov, A. Dunaev // *Appl. Sci.* – 2019. – 9(2). – P. 217.
20. Croce, A.C. Light and autofluorescence, multitasking features in living organisms / A.C. Croce // *Photochem.* – 2021. – 1(2). – P. 67-124.
21. Croce, A.C. Autofluorescence of liver tissue and bile: organ functionality monitoring during ischemia and reoxygenation / A.C. Croce, A. Ferrigno, G. Santin, V.M. Piccolini, G. Bottiroli, M. Vairetti // *Lasers Surg. Med.* – 2014. – 46(5). – P. 412-421.
22. Poulon, F. Real-time Brain Tumor imaging with endogenous fluorophores: a diagnosis proof-of-concept study on fresh human samples / F. Poulon, J. Pallud, P. Varlet, M. Zanello, F. Chretien, E. Dezamis, G. Abi-Lahoud, F. Nataf, B. Turak, B. Devaux, D.A. Haidar // *Sci. Rep.* – 2018. – 8(1). – P. 1-11.
23. Potapova, E.V. Evaluation of microcirculatory disturbances in patients with rheumatic diseases by the method of diffuse reflectance spectroscopy / E.V. Potapova, V.V. Dremine, E.A. Zherebtsov, I.N. Makovik, A.I. Zherebtsova, A.V. Dunaev, K.V. Podmasteryev, V.V. Sidorov, A.I. Krupatkin, L.S. Khakhicheva, V.F. Muradyan // *Hum. Physiol.* – 2017. – 43(2). – P. 222-228.
24. Spott, T. Application of optical diffusion theory to transcutaneous bilirubinometry / T. Spott, L.O. Svaasand, R.E. Anderson, P.F. Schmedling // *Proceedings of SPIE.* – 1998. – 3195. – P. 234-245.
25. Strattonnikov, A.A. Evaluation of blood oxygen saturation in vivo from diffuse reflectance spectra / A.A. Strattonnikov, V.B. Loschenov // *J. Biomed. Opt.* – 2001. – 6(4). – P. 457-468.
26. The International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines on Limits of Exposure to Ultraviolet Radiation of Wavelengths Between 180 nm and 400 nm (Incoherent Optical Radiation) // *Health Phys.* – 2004. – 87(2). – P. 171-186.
27. The International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. ICNIRP guidelines on limits of exposure to laser radiation of wavelengths between 180 nm and 1,000 µm // *Health Phys.* – 2013. – 105(3). – P. 271-295.
28. Croce, A.C. Autofluorescence-based optical biopsy: An effective diagnostic tool in hepatology / A.C. Croce, A. Ferrigno, G. Bottiroli, M. Vairetti // *Liver Int.* – 2018. – 38(7). – P. 1160-1174.
29. Datta, R. Fluorescence lifetime imaging microscopy: fundamentals and advances in instrumentation, analysis, and applications / R. Datta, T.M. Heaster, J.T. Sharick, A.A. Gillette, M.C. Skala // *J. Biomed. Opt.* – 2020. – 25(7). – P. 71203.
30. Alhallak, K. Optical redox ratio identifies metastatic potential-dependent changes in breast cancer cell metabolism / K. Alhallak, L.G. Rebello, T.J. Muldoon, K.P. Quinn, N. Rajaram // *Biomed. Opt. Express.* – 2016. – 7(11).

**Кандурова Ксения Юрьевна**  
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл  
Аспирант кафедры приборостроения, метрологии и сертификации, стажер-исследователь научно-технологического центра биомедицинской фотоники  
302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29  
E-mail: k.kandurova@oreluniver.ru

**Мамошин Андриан Валерьевич**  
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл  
Доктор медицинских наук, доцент, профессор кафедры специализированных хирургических дисциплин, старший научный сотрудник научно-технологического центра биомедицинской фотоники; БУЗ Орловской области «Орловская областная клиническая больница», г. Орёл  
врач-хирург  
E-mail: dr.mamoshin@mail.ru

**Потапова Елена Владимировна**  
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл  
Кандидат технических наук, доцент кафедры приборостроения, метрологии и сертификации, старший научный сотрудник научно-технологического центра биомедицинской фотоники  
302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29  
E-mail: e.potapova@oreluniver.ru

K.Y. KANDUROVA, A.V. MAMOSHIN, E.V. POTAPOVA

## POSSIBILITIES OF FLUORESCENCE AND REFLECTANCE SPECTROSCOPY FOR CLASSIFICATION OF THE FUNCTIONAL STATE OF THE LIVER IN PATIENTS WITH OBSTRUCTIVE JAUNDICE

**Abstract.** *The article is devoted to the analysis of the possibility of application of fluorescence spectroscopy and diffuse reflectance spectroscopy to assess the functional state of the liver in patients with obstructive jaundice syndrome. The data were collected in the clinic using the developed multimodal unit of fluorescence and diffuse reflectance spectroscopy with a special fiber optic probe during antegrade decompression of the bile ducts under ultrasound and x-ray control. The parameters describing the contribution of the main fluorophores of the liver parenchyma and the tissue saturation were calculated from the spectra. Using linear discriminant analysis, classifiers were proposed to predict the positive or negative dynamics of the postoperative period of patients with sensitivity and specificity up to 88% and 91%, respectively. The obtained results are promising for further development of the method of diagnosing the functional state of the liver in obstructive jaundice, providing additional diagnostic information and allowing to detect more severe conditions in the postoperative period of biliary decompression.*

**Keywords:** *liver, obstructive jaundice, liver failure, fluorescence spectroscopy, diffuse reflectance spectroscopy.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Pavlidis, E.T. Pathophysiological consequences of obstructive jaundice and perioperative management / E.T. Pavlidis, T.E. Pavlidis // *Hepatobiliary Pancreat. Dis. Int.* – 2018. – 17(1). – P. 17-21.
2. Lukmonov, S. Minimally invasive biliary decompression methods in management of obstructive jaundice of malignant etiology / S. Lukmonov // *HPB.* – 2018. – 20. – P. S730.
3. Moole, H. Efficacy of preoperative biliary drainage in malignant obstructive jaundice: a meta-analysis and systematic review / H. Moole, M. Bechtold, S.R. Puli // *World J. Surg. Oncol.* – 2018. – 14(1). – P. 1-11.
4. Shaib, Y. Preoperative biliary drainage for malignant biliary obstruction: results from a national database / Y. Shaib, M.A. Rahal, M.O. Rammal, A. Mailhac, H. Tamim // *J. Hepato-Biliary-Pancreatic Sci.* – 2017. – 24(11). – P. 637-642.
5. Galperin, E.I. Obstructive jaundice—a “false stable” condition, consequences of a “second hit”, management principles / E.I. Galperin // *Ann. khirurgicheskoy gepatologii= Ann. HPB Surg.* – 2011. – 16(3). – P. 16-25.
6. Barvanyan, G.M. Choice of Palliative Surgical Biliary Decompression for Inoperable Biliopancreatoduodenal Tumors / G.M. Barvanyan // *Ann. khirurgicheskoy gepatologii= Ann. HPB Surg.* – 2016. – 21(4). – P. 55-62. (In Russ.).
7. Croce, A.C. Autofluorescence spectroscopy and imaging: A tool for biomedical research and diagnosis / A.C. Croce, G. Bottiroli // *Eur. J. Histochem.* – 2014. – 58(4). – P. 320-337.
8. Dunaev, A.V. Individual variability analysis of fluorescence parameters measured in skin with different levels of nutritive blood flow / A.V. Dunaev, V.V. Dremine, E.A. Zhrebtsov, I.E. Rafailov, K.S. Litvinova, S.G. Palmer, N.A. Stewart, S.G. Sokolovski, E.U. Rafailov // *Med. Eng. Phys.* – 2020. – 120. – P. 107583.
9. Zhrebtsov, E.A. Fluorescentnaya diagnostika mitokondrialnoy funktsii v epiteliakh tkanykh in vivo: monografiya / E.A. Zhrebtsov, V.V. Dremine, A.I. Zhrebtsova, E.V. Potapova, Zhrebtsov. – Orel: FGBOU VO «OGU imeni I.S. Turgeneva», 2018. – 107 p. (In Russ.).
10. Dunaev, A.V. Multimodalnaya opticheskaya diagnostika mikrotsirkulyatorno-tkanykh sistem organizma cheloveka: monografiya / A.V. Dunaev. – Staryy Oskol: TNT, 2022. – 440 p. (In Russ.).
11. Kim, J.A. Optical spectroscopy for in vivo medical diagnosis—a review of the state of the art and future perspectives / J.A. Kim, D.J. Wales, G.-Z. Yang // *Prog. Biomed. Eng.* – 2020. – 2(4). – P. 42001.
12. Shirao, A.B. Autofluorescence of blood and its application in biomedical and clinical research / A.B. Shirao, R.S. Schloss, Z. Fritz, M.V. Shirao, R. Rosen, M.L. Yarmush // *Biotechnol. Bioeng.* – 2021. – 118(12). – P. 4550-4576.
13. He, Z. Novel endoscopic optical diagnostic technologies in medical trial research: recent advancements and

future prospects / Z. He, P. Wang, X. Ye // Biomed. Eng. Online. – 2021. – 20(1). – P. 1-38.

14. Dremine, V. Optical percutaneous needle biopsy of the liver: a pilot animal and clinical study / V. Dremine, E. Potapova, E. Zhrebtsov, K. Kandurova, V. Shupletsov, A. Alekseyev, A. Mamoshin, A. Dunaev // Sci. Rep. – 2020. – 10(1). – P. 14200.

15. Zhrebtsov, E.A. Fluorescence lifetime needle optical biopsy discriminates hepatocellular carcinoma / E.A. Zhrebtsov, E.V. Potapova, A.V. Mamoshin, V.V. Shupletsov, K.Y. Kandurova, V.V. Dremine, A.Y. Abramov, A.V. Dunaev // Biomed. Opt. Express. – 2022. – 13(2). – P. 633-646.

16. Alfano, R. Optical biopsy for cancer detection / R. Alfano, Y. Pu // Lasers for Medical Applications. – Woodhead Publishing, 2013. – P. 325-367.

17. Spliethoff, J.W. In vivo characterization of colorectal metastases in human liver using diffuse reflectance spectroscopy: Toward guidance in oncological procedures / J.W. Spliethoff, L.L. de Boer, M.A. Meier, W. Prevoo, J. de Jong, K. Kuhlmann, T.M. Bydlon, H.J. Sterenberg, B.H. Hendriks, T.J. Ruers // J. Biomed. Opt. – 2016. – 21(9). – P. 97004.

18. Braun, F. A customized multispectral needle probe combined with a virtual photometric setup for in vivo detection of Lewis lung carcinoma in an animal model / F. Braun, R. Schalk, M. Nachtmann, A. Hien, R. Frank, T. Beuermann, F.-J. Methner, B. Kränzlin, M. Rädle, N. Gretz // Meas. Sci. Technol. – 2019. – 30(10). – P. 104001.

19. Kandurova, K. Fiber-optic system for intraoperative study of abdominal organs during minimally invasive surgical interventions / K. Kandurova, V. Dremine, E. Zhrebtsov, E. Potapova, A. Alyanov, A. Mamoshin, Y. Ivanov, A. Borsukov, A. Dunaev // Appl. Sci. – 2019. – 9(2). – P. 217.

20. Croce, A.C. Light and autofluorescence, multitasking features in living organisms / A.C. Croce // Photochem. – 2021. – 1(2). – P. 67-124.

21. Croce, A.C. Autofluorescence of liver tissue and bile: organ functionality monitoring during ischemia and reoxygenation / A.C. Croce, A. Ferrigno, G. Santin, V.M. Piccolini, G. Bottiroli, M. Vairetti // Lasers Surg. Med. – 2014. – 46(5). – P. 412-421.

22. Poulon, F. Real-time Brain Tumor imaging with endogenous fluorophores: a diagnosis proof-of-concept study on fresh human samples / F. Poulon, J. Pallud, P. Varlet, M. Zanello, F. Chretien, E. Dezamis, G. Abi-Lahoud, F. Nataf, B. Turak, B. Devaux, D.A. Haidar // Sci. Rep. – 2018. – 8(1). – P. 1-11.

23. Potapova, E.V. Evaluation of microcirculatory disturbances in patients with rheumatic diseases by the method of diffuse reflectance spectroscopy / E.V. Potapova, V.V. Dremine, E.A. Zhrebtsov, I.N. Makovik, A.I. Zhrebtsova, A.V. Dunaev, K.V. Podmasteryev, V.V. Sidorov, A.I. Krupatkin, L.S. Khakhicheva, V.F. Muradyan // Hum. Physiol. – 2017. – 43(2). – P. 222-228.

24. Spott, T. Application of optical diffusion theory to transcutaneous bilirubinometry / T. Spott, L.O. Svaasand, R.E. Anderson, P.F. Schmedding // Proceedings of SPIE. – 1998. – 3195. – P. 234-245.

25. Stratonnikov, A.A. Evaluation of blood oxygen saturation in vivo from diffuse reflectance spectra / A.A. Stratonnikov, V.B. Loschenov // J. Biomed. Opt. – 2001. – 6(4). – P. 457-468.

26. The International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines on Limits of Exposure to Ultraviolet Radiation of Wavelengths Between 180 nm and 400 nm (Incoherent Optical Radiation) // Health Phys. – 2004. – 87(2). – P. 171-186.

27. The International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. ICNIRP guidelines on limits of exposure to laser radiation of wavelengths between 180 nm and 1,000 µm // Health Phys. – 2013. – 105(3). – P. 271-295.

28. Croce, A.C. Autofluorescence-based optical biopsy: An effective diagnostic tool in hepatology / A.C. Croce, A. Ferrigno, G. Bottiroli, M. Vairetti // Liver Int. – 2018. – 38(7). – P. 1160-1174.

29. Datta, R. Fluorescence lifetime imaging microscopy: fundamentals and advances in instrumentation, analysis, and applications / R. Datta, T.M. Heaster, J.T. Sharick, A.A. Gillette, M.C. Skala // J. Biomed. Opt. – 2020. – 25(7). – P. 71203.

30. Alhallak, K. Optical redox ratio identifies metastatic potential-dependent changes in breast cancer cell metabolism / K. Alhallak, L.G. Rebello, T.J. Muldoon, K.P. Quinn, N. Rajaram // Biomed. Opt. Express. – 2016. – 7(11). – P. 4364-4374.

**Kandurova Ksenia Yurievna**  
Orel State University,  
Postgraduate Student of the  
Department of Instrumentation,  
Metrology and Certification,  
research assistant of Research &  
Development Center of  
Biomedical Photonics  
302020, Orel, Naugorskoe  
Shosse, 29  
E-mail:  
k.kandurova@oreluniver.ru

**Mamoshin Andrian Valerievich**  
Orel State University,  
Doctor of Medical Sciences, associate  
professor,  
professor of the Department of Specialized  
Surgical Disciplines, senior researcher of  
Research and Development Center of  
Biomedical Photonics;  
Orel Regional Clinical Hospital  
surgeon  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: dr.mamoshin@mail.ru

**Potapova Elena Vladimirovna**  
Orel State University,  
Ph.D., associate professor of the  
Department of Instrumentation,  
Metrology and Certification,  
senior researcher of Research and  
Development Center of  
Biomedical Photonics  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse,  
29  
E-mail: e.potapova@oreluniver.ru

Ю.О. СТРЕЛЯНАЯ, А.Ю. ТАРАХОВСКИЙ

## ЦИФРОВОЙ ИНЖИНИРИНГ - АЛЬТЕРНАТИВА ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ

**Аннотация.** В данной работе рассматривается применение цифрового проектирования как альтернативного решения проблемы импортозамещения в машиностроительной отрасли в условиях санкционного давления и ухода западных компаний с российского рынка. Объединение классических методов обратного инжиниринга с возможностями цифровых технологий позволяет создавать усовершенствованные версии изделий - цифровые двойники. В статье описывается процесс разработки цифрового двойника коленчатого вала с использованием 3D-сканирования и моделирования в САПР. Для анализа и оптимизации конструкции детали выполняется конечно-элементный анализ с использованием модуля T-Flex Анализ для оценки статического напряженно-деформированного состояния. Делается вывод о рациональности применения цифровых двойников для решения задач импортозамещения и модернизации высокотехнологичного оборудования, что позволяет значительно повысить эффективность и точность инженерных расчетов и прогнозирования.

**Ключевые слова:** цифровой инжиниринг, импортозамещение, реверс-инжиниринг, цифровой двойник, 3d-сканирование, конечно-элементный анализ, коленвал, САПР (система автоматизированного проектирования), напряженно-деформированное состояние, высокотехнологичное оборудование.

### Введение

В условиях санкционного давления и ухода многих западных компаний с отечественного рынка, предприятия столкнулись с проблемой отсутствия оригинальных комплектующих для различных видов техники. В рамках импортозамещения ключевым элементом становится локализация производства импортных товаров на территории России и, как следствие, необходимость использования процессов обратного инжиниринга [1, 2].

Обратный инжиниринг включает в себя процесс исследования готового механизма с целью воссоздания копии объекта. Это включает снятие точных размеров и геометрии деталей, изучение химико-механических свойств материалов и компонентов, определение качества поверхностей и покрытий, подлежащих обработке, а также модернизацию и восстановление технической, конструкторской и технологической документации на копируемое изделие [3, 4].

Важно отметить, что обратная разработка должна базироваться не на простом копировании, а на усовершенствовании зарубежных разработок. Цифровое проектирование помогает российскому рынку решить сложную, наукоемкую задачу импортозамещения. Объединение классического обратного инжиниринга с возможностями цифровых технологий позволяет создавать усовершенствованные версии изделий – цифровые двойники. Цифровые двойники позволяют не только воспроизводить, но и изменять конструкцию деталей для упрощения технологии изготовления, улучшения свойств или адаптации под российские производственные мощности [5 - 7].

### Основная часть

В качестве примера цифрового двойника рассмотрим коленчатый вал с шатунами и поршнями, входящие в состав двухпоршневого компрессора холодильной установки. Коленвал играет ключевую роль в компрессоре, преобразуя возвратно-поступательное движение поршней во вращательное движение. Поскольку промышленным партнером был предоставлен коленвал с изношенными поверхностями, необходимо было создать 3D модели с полным восстановлением геометрии.

**Цель статьи** – анализ рациональности создания цифрового двойника с применением метода конечных элементов.

Первым этапом создания цифрового двойника является получение точной трехмерной модели коленвала. Для этого может быть использовано 3D сканирование реального образца с помощью высокоточного сканера или обратное проектирование на основе чертежей и технической документации [8].



Полученная 3D модель служит основой для дальнейшего моделирования и анализа с помощью специализированного программного обеспечения.

Для создания цифрового двойника использовался ручной 3D-сканер Scanform L5 с погрешностью измерений 0,04 мм. Высокая точность сканера позволяет использовать его в качестве измерительного прибора и проводить сканирование объекта в движении и под любым углом. Для сканирования на коленчатый вал были нанесены маркеры, и сканирование производилось с шести сторон, с последующей обработкой и сшивкой полигональной сетки (рисунок 1).

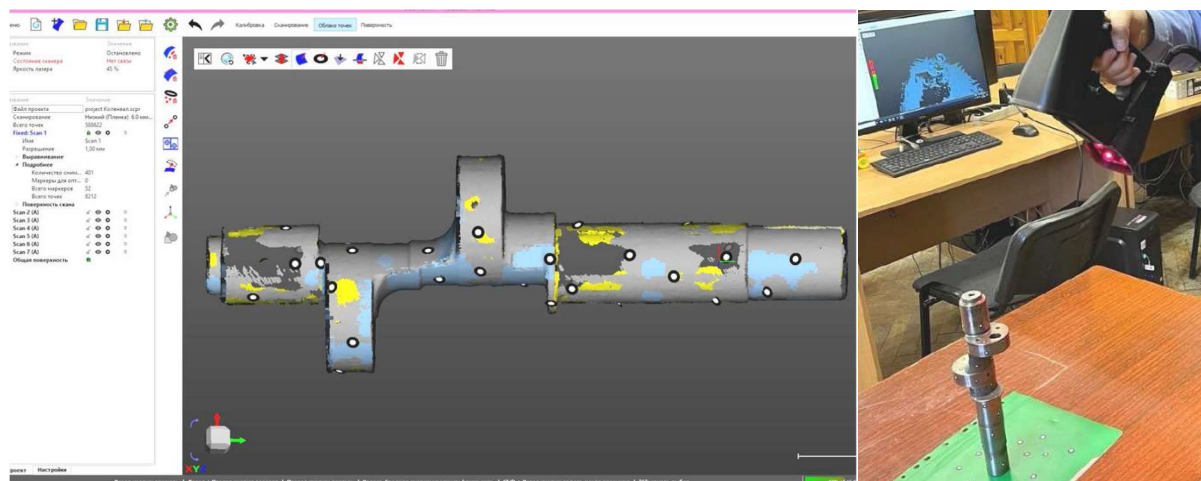


Рисунок 1 – Сканирование коленвала ручным сканером Scanform L5

Далее полученная полигональная модель была загружена в САПР Компас-3D (рисунок 2), где было проведено дальнейшее моделирование.

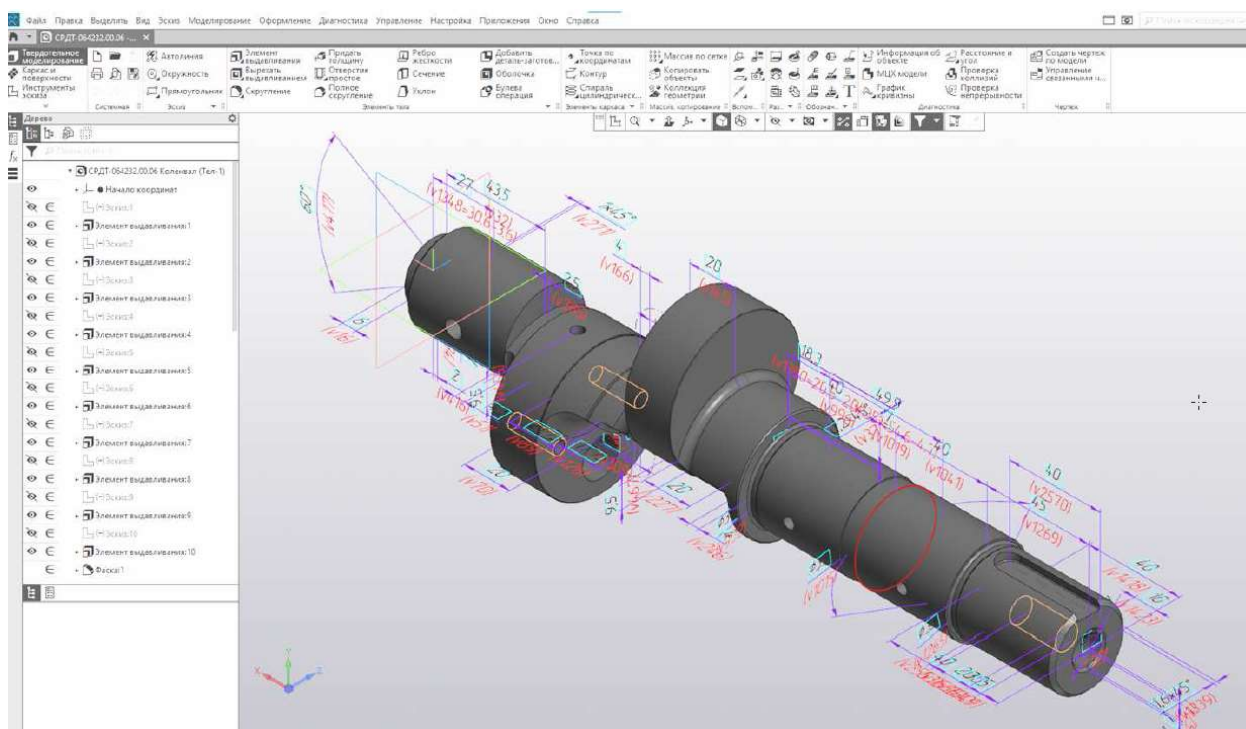


Рисунок 2 - 3D модель коленчатого вала

Полученные с помощью 3D-сканирования и моделирования в Компас 3D данные позволяют создавать высокоточные геометрические модели объектов. Эти модели могут быть использованы для проведения различных видов анализа и позволяют проводить различные



расчеты: статический анализ, частотный анализ, анализ устойчивости, тепловой анализ, анализ вынужденных колебаний и анализ усталости.

Коленчатый вал компрессора холодильной установки является критическим компонентом, который испытывает значительные нагрузки во время работы. Для повышения надежности и эффективности работы компрессоров целесообразно использовать цифровые двойники, что позволяет проводить всесторонний анализ и оптимизацию конструкции. Метод конечных элементов (МКЭ) является мощным инструментом для выполнения таких задач.

Применение МКЭ позволяет учесть различные факторы, такие как материалы, нагрузки, граничные условия и другие параметры, что обеспечивает высокую точность и достоверность результатов моделирования. Полученные данные могут использоваться для оптимизации конструкции, повышения надежности и безопасности изделия, а также для прогнозирования его поведения в различных условиях эксплуатации.

Цифровой двойник и метод конечных элементов тесно взаимосвязаны и дополняют друг друга. Использование цифрового двойника совместно с МКЭ позволяет создавать высокоточные и достоверные виртуальные модели физических объектов и процессов, что открывает новые возможности для оптимизации, прогнозирования и принятия обоснованных решений на различных этапах жизненного цикла изделия.

Для проведения конечно-элементного анализа цифрового двойника коленчатого вала была использована программная система T-Flex Анализ [9, 10], ориентированная на решение физических задач в объемной постановке.

На первом этапе создается сетка из тетраэдральных элементов, аппроксимирующих геометрию коленчатого вала. Тетраэдральный конечный элемент удобен для автоматической генерации расчетной сетки, так как позволяет с высокой точностью аппроксимировать сложные формы изделий [11] (рисунок 3).



Рисунок 3 - Создание сетки конечно-элементного анализа

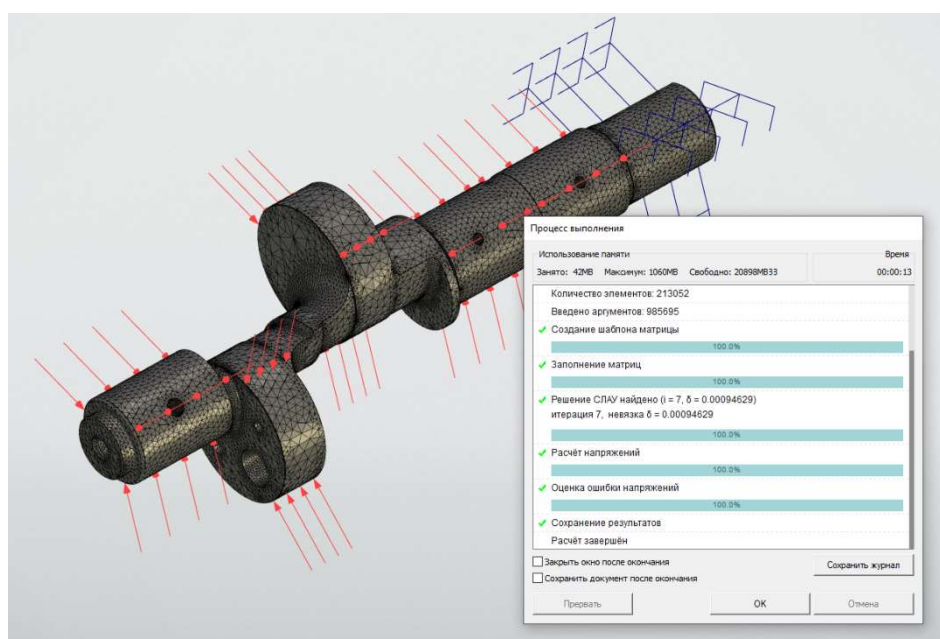
Далее, на основе результатов материаловедческой экспертизы, был подобран материал-аналог из базы данных T-Flex Анализа, соответствующий материалу реального коленчатого вала.

Следующим шагом было задание граничных условий, включающих закрепления в местах опор и шатунов, а также приложенные к системе внешние нагрузки, соответствующие условиям эксплуатации компрессора (рисунок 4).

В качестве степеней свободы для пространственных конечных элементов являются перемещения в направлении осей локальной системы координат. Для конечных элементов оболочек к трем перемещениям в каждом узле добавлены по три угла поворота нормали к срединной поверхности области, аппроксимируемой элементом, относительно тех же осей.

Для каждого конечного элемента, имеющего перемещения (углы поворота) в узлах и аппроксимирующие функции, была рассчитана деформация. В пределах элементов деформации остаются постоянными при линейной зависимости и изменяются линейно при параболической зависимости. На основе этих деформаций были вычислены напряжения в элементах. В случае необходимости возможно усреднение напряжений в узлах смежных элементов (функция программы) с последующим пересчётом напряжений в пределах каждого

элемента. Этот этап является весьма ответственным и решается по-разному в различных программных модулях.



*Рисунок 4 - Наложение граничных условий. Задание закреплений*

Модуль статического анализа системы конечно-элементного моделирования T-Flex Анализ предназначен для расчёта статического напряжённого состояния объёмных конструкций в среде T-Flex CAD и не требует отдельных построений для расчёта специальной трёхмерной модели [9]. Результаты анализа представлены на рисунке 5.

Тепловой анализ коленчатого вала компрессора позволяет оценить влияние температурных режимов на его прочностные характеристики. Это важно для предотвращения перегрева и последующих повреждений конструкции. Таким образом, используя цифровой двойник, был проведен тепловой анализ коленчатого вала компрессора при различных режимах работы. МКЭ позволил определить области с критическими температурами, что привело к улучшению системы охлаждения и повышению эффективности работы компрессора. В результате была снижена вероятность перегрева и продлен срок службы вала.

Во время работы, коленчатый вал компрессора подвергается циклическим нагрузкам, что приводит к усталостному износу. Анализ усталостной прочности позволяет прогнозировать срок службы вала и выявлять критические зоны, подверженные усталостному разрушению. С использованием цифрового двойника был проведен усталостный анализ коленчатого вала компрессора при различных режимах эксплуатации. МКЭ позволил предсказать срок службы вала и выявить зоны, подверженные наибольшему износу. Это позволило внести изменения в конструкцию и материал вала, увеличив его срок службы на 25%.

Основными результатами статических расчётов являются: поля перемещений модели изделия в расчётных точках конечно-элементной сетки; поля относительных деформаций; поля компонентов напряжений; энергия деформаций; узловые усилия; поля распределения коэффициента запаса по напряжениям по объёму конструкции. На этапе проектирования будущего механизма, цифровой двойник позволяет проводить многовариантный анализ и оптимизацию конструкции коленчатого вала, что способствует улучшению его характеристик без значительного увеличения затрат.

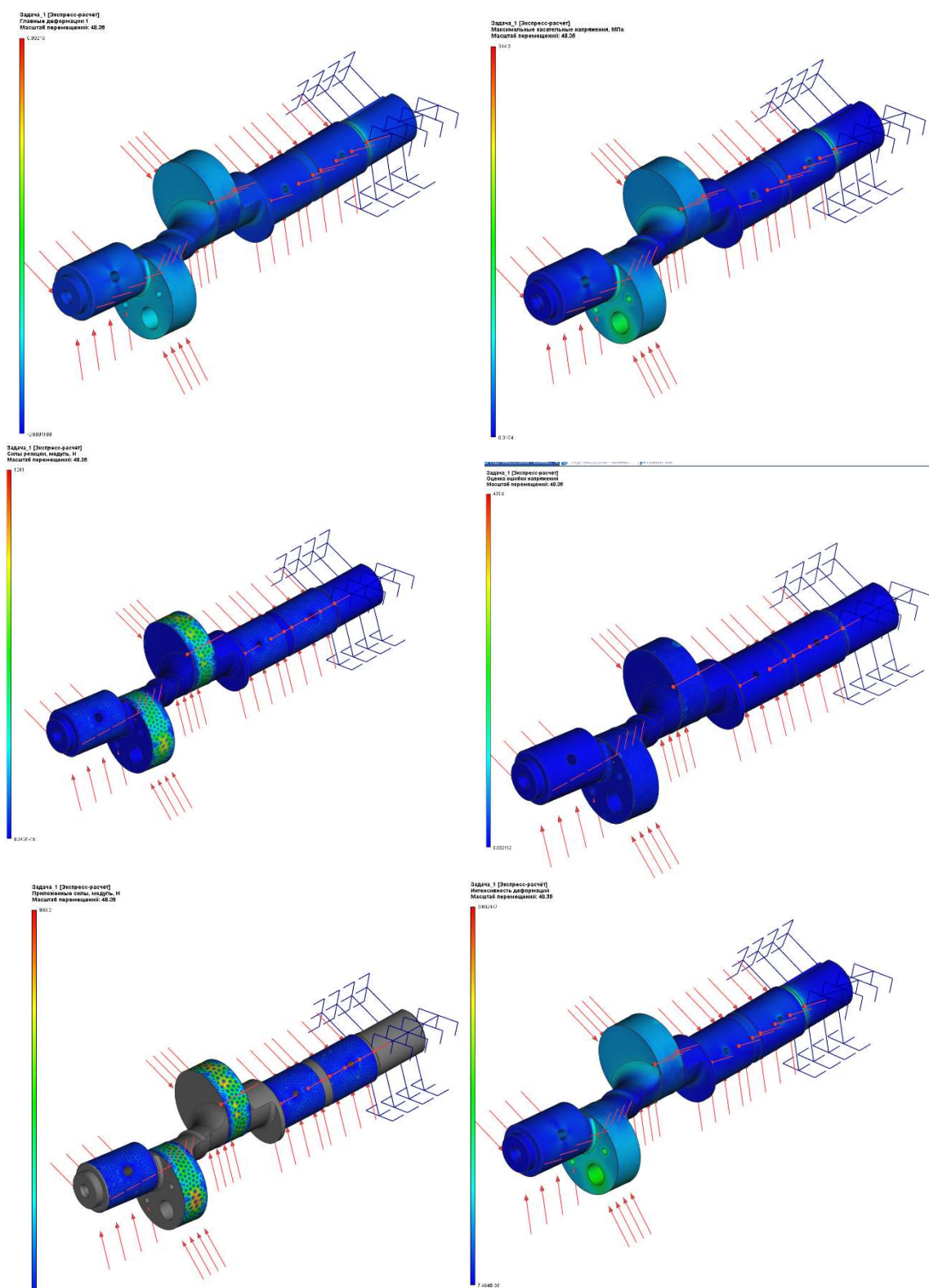


Рисунок 5 – Результаты статического анализа

### Заключение

По результатам выполненных исследований, можно сделать вывод что дополнение обратного инжиниринг цифровыми двойниками с использованием метода конечных элементов демонстрируют значительные преимущества данного подхода в анализе, оптимизации и прогнозировании характеристик сложных технических систем. Интеграция цифрового двойника с МКЭ позволяет повысить надежность, долговечность и эффективность работы коленчатого вала, что оказывает положительное влияние на общую производительность и безопасность эксплуатации компрессора.

Таким образом, применение цифрового инжиниринга открывает новые возможности для импортозамещения и локализации производства высокотехнологичных компонентов, обеспечивая повышение качества и конкурентоспособности отечественной продукции.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhukov, A. Methodology for selecting objects for reverse engineering at oil and gas industry enterprises / A. Zhukov, T. Berkutova, D. Zhurenkov [et al.] // IX International Conference on Advanced Agritechnologies, Environmental Engineering and Sustainable Development, Namangan, Uzbekistan, 26 октября – 03 ноября 2023 года. Vol. 486. – EDP Sciences - Web of Conferences: EDP Sciences - Web of Conferences, 2024. – P. 04020. – DOI 10.1051/e3sconf/202448604020.
2. Помпеев, К.П. Автоматизированная конструкторско-технологическая подготовка в условиях цифрового производства / К. П. Помпеев, О. С. Тимофеева, Е. И. Яблочников, Е. Е. Волосатова // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2023. – Т. 66, № 1. – С. 7-15. – DOI 10.17586/0021-3454-2023-66-1-7-15.
3. Ерпалов, А. В. Актуальные проблемы создания цифровых двойников изделий машиностроения с точки зрения оценки долговечности / А. В. Ерпалов, К. А. Хорошевский, И. В. Гадолина // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2023. – Т. 89, № 8. – С. 67-75. – DOI 10.26896/1028-6861-2023-89-8-67-75.
4. The use of the digital twin in the design of a prefabricated product / D. Golovin, A. Smolyaninov, D. Degtev, A. Matusевич // E3s web of conferences: XV International Scientific Conference on Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry “State and Prospects for the Development of Agribusiness - INTERAGROMASH 2022”, Rostov-on-Don, 25–27 мая 2022 года. Vol. 363. – EDP Sciences: EDP Sciences, 2022. – P. 04001. – DOI 10.1051/e3sconf/202236304001.
5. Коваль, С. Н. Использование технологии цифрового двойника при разработке газотурбинных двигателей / С. Н. Коваль, А. В. Бадерников, Ю. Н. Шмотин, К. Р. Пятунин // Вестник Московского авиационного института. – 2021. – Т. 28, № 3. – С. 139-145. – DOI 10.34759/vst-2021-2-139-145.
6. Виноградов, К. А. Опыт АО «ОДК» по внедрению технологий цифрового двойника при создании газотурбинных двигателей / К. А. Виноградов, А. С. Никулин, Ю. Н. Шмотин // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2023. – Т. 22, № 4. – С. 25-36. – DOI 10.18287/2541-7533-2023-22-4-25-36.
7. Подрез, Н. В. Разработка методики оценки технологичности конструкции изделия на основе 3D-модели изделия машиностроения / Н. В. Подрез, А. С. Говорков // Вестник Московского авиационного института. – 2023. – Т. 30, № 1. – С. 198-207. – DOI 10.34759/vst-2023-1-198-207.
8. Тараховский, А. Ю. Реверс-инжиниринг коленчатого вала компрессора / А. Ю. Тараховский, И. А. Смирнов // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2023. – № 18. – С. 91-97.
9. T-Flex Анализ. Пособие по работе с системой / АО «Топ системы». – М., 2009. – 146 с.
10. Бунаков П. Ю. Сквозное проектирование в T-FLEX: учебное пособие / П. Ю. Бунаков. – М.: ДМК Пресс, 2009. – 400 с.
11. Стреляная, Ю. О. Статический анализ шпиндельного вала тяжёлого токарного станка в САПР T-FLEX CAD / Ю. О. Стреляная, О. В. Мухина // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2021. – № 1(71). – С. 268-273.

**Стреляная Юлия Олеговна**  
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь  
Кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Цифровое проектирование»  
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, д.33  
E-mail: yostrelyanaya@mail.sevsu.ru

**Тараховский Алексей Юрьевич**  
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь  
Кандидат технических наук, доцент, заведующий  
кафедрой «Цифровое проектирование»  
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, д.33  
E-mail: aytarakhovskiy@mail.sevsu.ru

YU.O. STRELYANAYA, A.YU. TARAKHOVSKIY

## DIGITAL ENGINEERING AN ALTERNATIVE TO IMPORT SUBSTITUTION IN MECHANICAL ENGINEERING

**Abstract.** This paper examines the application of digital design as an alternative solution to the problem of import substitution in the machine-building industry in the context of sanctions pressure and the withdrawal of Western companies from the Russian market. Combining classical reverse engineering methods with the capabilities of digital technologies allows you to create improved versions of products - digital twins. The article describes the process of

*developing a digital crankshaft twin using 3D scanning and CAD modeling. To analyze and optimize the design of the part, a finite element analysis is performed using the T-Flex Analysis module to evaluate the static stress-strain state. The conclusion is made about the rationality of using digital twins to solve the problems of import substitution and modernization of high-tech equipment, which can significantly increase the efficiency and accuracy of engineering calculations and forecasting.*

**Keywords.** *digital engineering, import substitution, reverse engineering, digital twin, 3d scanning, finite element analysis, crankshaft, CAD (computer-aided design system), stress-strain state, high-tech equipment.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Zhukov, A. Methodology for selecting objects for reverse engineering at oil and gas industry enterprises / A. Zhukov, T. Berkutova, D. Zhurenkov [et al.] // IX International Conference on Advanced Agritechnologies, Environmental Engineering and Sustainable Development, Namangan, Uzbekistan, October 26 – 03 2023. Vol. 486. – EDP Sciences - Web of Conferences: EDP Sciences - Web of Conferences, 2024. – P. 04020. – DOI 10.1051/e3sconf/202448604020.
2. Pompeyev, K.P. Automated design and technological training in the conditions of digital production / K. P. Pompeyev, O. S. Timofeeva, E. I. Yablochnikov, E. E. Volosatova // News of higher educational institutions. Instrumentation. - 2023. – Vol. 66, No. 1. – pp. 7-15. – DOI 10.17586/0021-3454-2023-66-1-7-15.
3. Erpalov, A.V. Actual problems of creating digital counterparts of mechanical engineering products from the point of view of durability assessment / A.V. Erpalov, K. A. Khoroshevsky, I. V. Gadolina // Factory laboratory. Diagnostics of materials. – 2023. – vol. 89, No. 8. – pp. 67-75. – DOI 10.26896/1028-6861-2023-89-8-67-75.
4. The use of the digital twin in the design of a prefab product / D. Golovin, A. Smolyaninov, D. Degtev, A. Matusevich // E3s web of conferences: XV International Scientific Conference on Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry “State and Prospects for the Development of Agribusiness - INTERAGROMASH 2022”, Rostov-on-Don, May 25-27, 2022. Vol. 363. – EDP Sciences: EDP Sciences, 2022. – P. 04001. – DOI 10.1051/e3sconf/202236304001.
5. Koval, S. N. The use of digital twin technology in the development of gas turbine engines / S. N. Koval, A.V. Badernikov, Yu. N. Shmotin, K. R. Pyatunin // Bulletin of the Moscow Aviation Institute. – 2021. – Vol. 28, No. 3. – pp. 139-145. – DOI 10.34759/vst-2021-2-139-145.
6. Vinogradov, K. A. The experience of JSC UEC on the introduction of digital twin technologies in the creation of gas turbine engines / K. A. Vinogradov, A. S. Nikulin, Yu. N. Shmotin // Bulletin of the Samara University. Aerospace engineering, technology and mechanical engineering. - 2023. – Vol. 22, No. 4. – pp. 25-36. – DOI 10.18287/2541-7533-2023-22-4-25-36.
7. Podrez, N. V. Development of a methodology for evaluating the manufacturability of a product design based on a 3D model of a machine-building product / N. V. Podrez, A. S. Govorkov // Bulletin of the Moscow Aviation Institute. – 2023. – Vol. 30, No. 1. – pp. 198-207. – DOI 10.34759/vst-2023-1-198-207.
8. Tarakhovskiy, A. Y. Reverse engineering of the compressor crankshaft / A. Y. Tarakhovskiy, I. A. Smirnov // Transport, mining and construction engineering: science and production. – 2023. – № 18. – p. 91-97.
9. T-Flex Analysis. Manual for working with the system / JSC « Top Systems». – M., 2009. – 146 p.
10. Bunakov P. O. End-to-end Design in T-FLEX: a tutorial / P. O. Bunakov. – M.: DMK Press, 2009. – 400p.
11. Strelyanaya Y. O. Static analysis of the spindle shaft of a heavy lathe in T-FLEX CAD / Y. O. Strelyanaya, O. V. Muhina // Scientific notes of the Crimean Engineering and Pedagogical University. – 2021. – № 1(71). – p. 268-273.

### Strelyanaya Yulia Olegovna

FSAOU HE «Sevastopol State University», Sevastopol  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
Department of «Digital Design»  
299053, Sevastopol, Universitetskaya str., h.33  
E-mail: YOSTrelyanaya@mail.sevsu.ru

### Tarakhovskiy Alexey Yuryevich

FSAOU HE «Sevastopol State University», Sevastopol  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head  
of the Department of «Digital Design»  
299053, Sevastopol, Universitetskaya str., h.33  
E-mail: AYTarakhovskiy@mail.sevsu.ru

© Ю.О. Стреляная, А.Ю. Тараховский, 2024



А.О. ХАРЧЕНКО, С.В. КОРЧЕВСКИЙ, А.А. ХАРЧЕНКО

## СТЕНДОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЗАТЫЛОВАННЫХ МЕЛКОРАЗМЕРНЫХ МЕТЧИКОВ

**Аннотация.** Статья посвящена вопросам проведения экспериментальных исследований надежности метчиков, затылованных способом радиальной подачи и метчиков, зубья которых получены методом осевого возвратно-поступательного перемещения затылующего инструмента. Для испытаний брали трехгранные затылованные пластически деформирующие метчики (ПДМ), машинно-ручные метчики (МРМ) и затылованные режущие-деформирующие метчики (РДМ). Предельное затупление каждого из вариантов метчиков сопровождалось ростом крутящих моментов до экстремальных значений  $M_{кр.э}$ , которые для режущих МРМ, ПДМ и РДМ превышали их соответственно в 1,6, 1,8 и 1,7 раз. Наиболее характерными видами параметрических отказов режущих МРМ были наростообразование обрабатываемого материала на передних и боковых поверхностях зубьев, скалывание вершин зубьев, притупление кромок и оплавление кромок зубьев рабочей части. Для ПДМ было наиболее характерным явление наростообразования на заборном и калибрующем участках, износ витков резьбы на боковых сторонах профиля и по наружному диаметру. При работе РДМ на режущих участках наблюдались скалывание вершин и притупление кромок, а на деформирующих участках – наростообразование и скругление вершин зубьев. Представленные результаты подтверждают эффективность экспериментальных исследований надежности мелкоразмерных метчиков на основе прогрессивного стендового оборудования и разработанной методики.

**Ключевые слова:** мелкоразмерный метчик, безотказность метчика, поле допусков резьбовых профилей, контроль величины износа, экспериментальная установка, динамометр, эксплуатационная надежность метчика.

### Введение

В настоящее время наиболее прогрессивным методом обработки внутренних резьб в деталях из различных материалов является применение режущих, а также пластически деформирующих метчиков.

Рассмотрение особенностей процесса затылования зубьев рабочей части мелкоразмерных метчиков позволяет выполнить усовершенствование технологии их обработки с целью повышения точности и качества затылуемых поверхностей. Предлагаемая технология предполагает использование осевого возвратно-поступательного перемещения затылующего инструмента, а также сочетание его с дополнительным радиальным перемещением, реализуемым на усовершенствованном станочном оборудовании [1, 2]. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования процесса мелкоразмерной резьбообработки с использованием метчиков, затылованных способом радиальной подачи и метчиков, зубья которых получены методом осевого возвратно-поступательного перемещения затылующего инструмента, подтверждают преимущество последних не только по точности обработки резьбового отверстия, но также по стойкости и экономической эффективности.

Традиционно затылование осуществляется за счет радиального перемещения инструмента (резьбошлифовального круга) в процессе обработки зубьев рабочей части метчиков. Такой метод зачастую не обеспечивает требуемые показатели точности и качества затылуемых поверхностей, в особенности, мелкоразмерных метчиков [3, 4].

В этой связи вопрос проведения экспериментальных исследований надежности метчиков, затылованных способом радиальной подачи и метчиков, зубья которых получены методом осевого возвратно-поступательного перемещения затылующего инструмента представляет актуальную задачу, решение которой связано с повышением точности обработки, качества получаемой резьбовой поверхности, стойкости, прочности и производительности при формировании резьбы.

Целью данной работы является повышение эффективности экспериментальных исследований надежности мелкоразмерных метчиков на основе прогрессивного стендового оборудования и разработанной методики.

В связи с этим является целесообразным рассмотрение показателей безотказности с учетом потоков параметрических отказов и отказов функционирования метчиков,

характеризующих их технологическую и эксплуатационную надежность для выработки рекомендаций по усовершенствованию конструкций с учетом исследовательского опыта в данной области.

### Основная часть

Безотказность резьбообразующих инструментов, в частности, метчиков, как главное свойство их надежности, является важнейшим показателем стабильно отлаженного технологического процесса изготовления резьбовых деталей в производстве. На нее оказывают воздействие различные факторы: правильность выполнения конструктивных элементов зубьев инструмента, начальные отклонения формы и размеров, присутствующие в качестве погрешностей, твердость и прочность сердцевины и поверхности инструмента, наличие упрочняющего покрытия и т.д. Наиболее существенным фактором является изменение размеров рабочих поверхностей инструмента (занижение высоты режущей кромки, увеличение углов заострения, размеров скругления кромок и т.п.) в процессе резьбообразования, представляющее собой износ [5-7].

В данном случае использован вариант испытаний по экстремальному уровню, который основан на том, что для объектов с высокими требованиями к надежности нет необходимости выявлять весь закон распределения, а надо исследовать лишь ту его часть в области более низких значений наработки до отказа, которая по площади равна допустимой вероятности отказа. При испытании на надежность по данному методу устанавливали экстремальные (наиболее тяжелые) условия по следующим факторам:

А) режимы работы – скорость  $V = 0,042 \dots 0,150$  м/с;

Б) нагрузка  $M_{кр} = 1,8 \dots 3,2$  Нм (размеры резьбы – М4);

В) материалы – труднообрабатываемые стали и сплавы (34ХНЗМ,  $\sigma_s = 0,58 \cdot 10^{-3}$  Н/мм<sup>2</sup>; ВЖЗ6-2,  $\sigma_s = 0,8 \cdot 10^{-3}$  Н/мм<sup>2</sup>; ВТ-3,  $\sigma_s = 0,95 \cdot 10^{-3}$  Н/мм<sup>2</sup>).

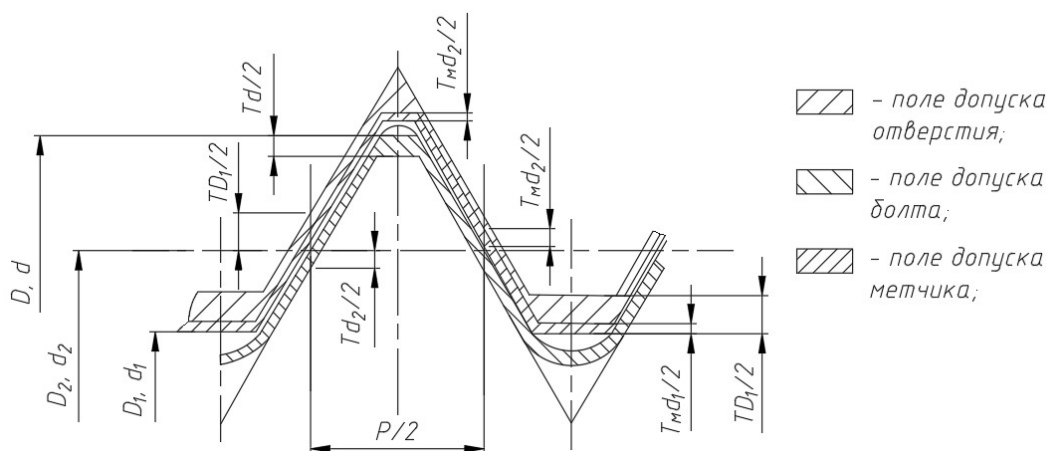


Рисунок 1 – Схема полей допусков резьбовых профилей отверстия, болта и метчика

На рисунке 1 приведена схема расположения полей допусков внутреннего диаметра отверстия, в котором формируется резьба, а также болта и метчика. Поле допуска среднего диаметра метчика обозначено как  $T_m d_2$ . Данная величина изменяется в соответствии с величиной износа рабочих элементов инструмента, преимущественно, зубьев. Допустимая величина износа зубьев по задней поверхности равна:

$$U_3 = \frac{d_{\min}^m - D_{\min}}{2},$$

где  $d_{\min}^m$  – минимальное значение наружного диаметра резьбы метчика, мм;  $D_{\min}$  – минимальное значение диаметра впадин резьбы отверстия, мм.

Допустимая величина износа по боковым поверхностям зубьев метчиков в радиальном направлении вычисляется по формуле:

$$U_{cp} = \frac{d_{\min}^M - D_{2\min}}{2},$$

где  $D_{2\min}$  – минимальное значение среднего диаметра резьбы отверстия, мм.

При контроле износа зубьев метчиков использованы микроскопы БМИ-1 и «Мир-2», а также видеокамера с возможностью вывода контролируемого резьбового профиля на экран (рисунок 2, а, б). Для упрощения контроля износа по боковым поверхностям введена величина  $U_{np}$  – износ в осевом направлении по среднему диаметру резьбы:

$$U_{np} = U_{cp} \cos 60^\circ = \frac{U_{cp}}{2}.$$



Рисунок 2 – Установки для контроля величины износа метчиков

Для метчиков М4 выделенных классов точности по приведенным зависимостям рассчитаны допустимые величины износа зубьев по задней и боковым поверхностям (таблица 1).

Таблица 1 – Допустимые величины износа зубьев метчиков М4

Класс точности	Н1		Н2		Н3		Н4	
	$U_z$ , мкм	$U_{cp}$ , мкм	$U_z$ , мкм	$U_{cp}$ , мкм	$U_z$ , мкм	$U_{cp}$ , мкм	$U_z$ , мкм	$U_{cp}$ , мкм
4Н5Н	47	28						
5Н6Н	47	28	47	40				
6Н	47	28	47	40	47	52	47	40
6G	34	15	34	27	34	39	34	20
7Н	47	28	47	40	47	52	47	40
7G	34	15	34	27	34	39	34	27

Превышение предельных величин  $U_z$  и  $U_{np}$  приводит к параметрическому отказу инструмента, то есть резьбовой профиль обрабатываемого отверстия детали выходит за пределы требуемой точности. Исследование потоков параметрических отказов и отказов функционирования затылочных мелкогазовых метчиков было произведено с помощью экспериментальной установки, общий вид которой представлен на рисунке 3.

Установка спроектирована и изготовлена на базе токарно-винторезного станка 1М61П и содержит специальный шпиндельный узел 1, устройство для позиционирования и фиксации



технологических образцов 2, измерительную 3, а также усилительную аппаратуру 4 (тип УТ 4-1).

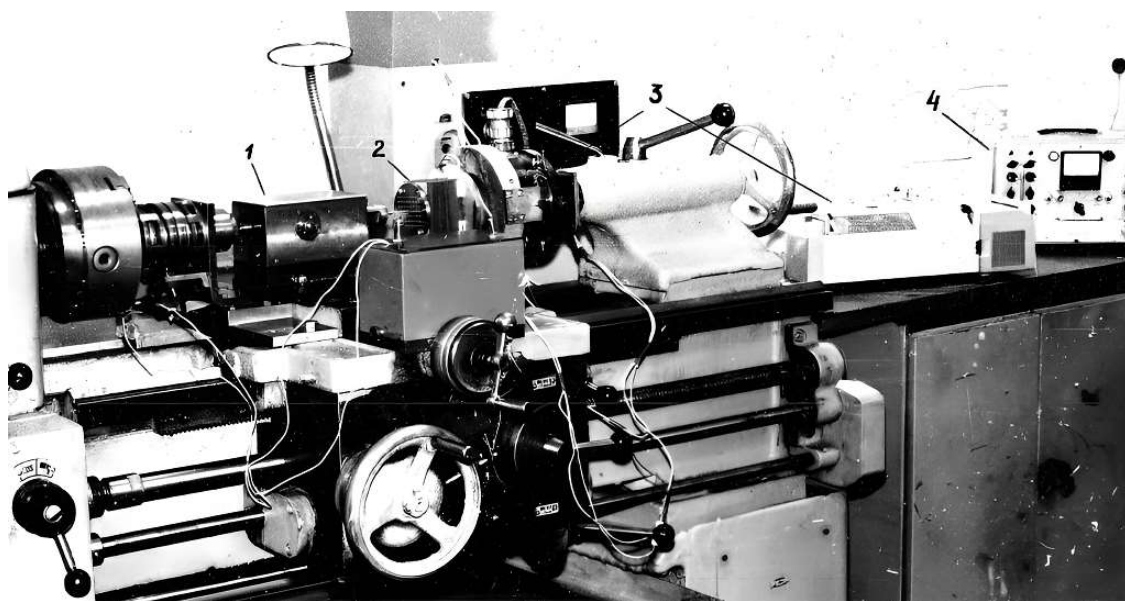


Рисунок 3 – Общий вид экспериментальной установки для исследования надежности метчиков

Привод главного движения станка позволяет обеспечить скорости резбобработки в диапазоне 0,03...0,5 м/с. Специальный шпиндельный узел (рисунок 4) установлен на суппорте 1 станка неподвижно. Метчику 2 сообщают вращательное движение и осевую подачу посредством сменной копирной пары ходовой винт 3 – гайка 4, расположенной в корпусе 5. Шаг сменных копирных пар равен шагу резьбы исследуемых метчиков 2. Между основанием и корпусом 5 установлена прокладка из диэлектрического материала. Ведомый шпиндель 6 с закрепленным на нем ходовым винтом 3 расположен в опорах 7 корпуса 5. Между основным шпинделем станка и ведомым шпинделем 6 находятся электромагнитные пусковая 8 и тормозная 9 муфты.

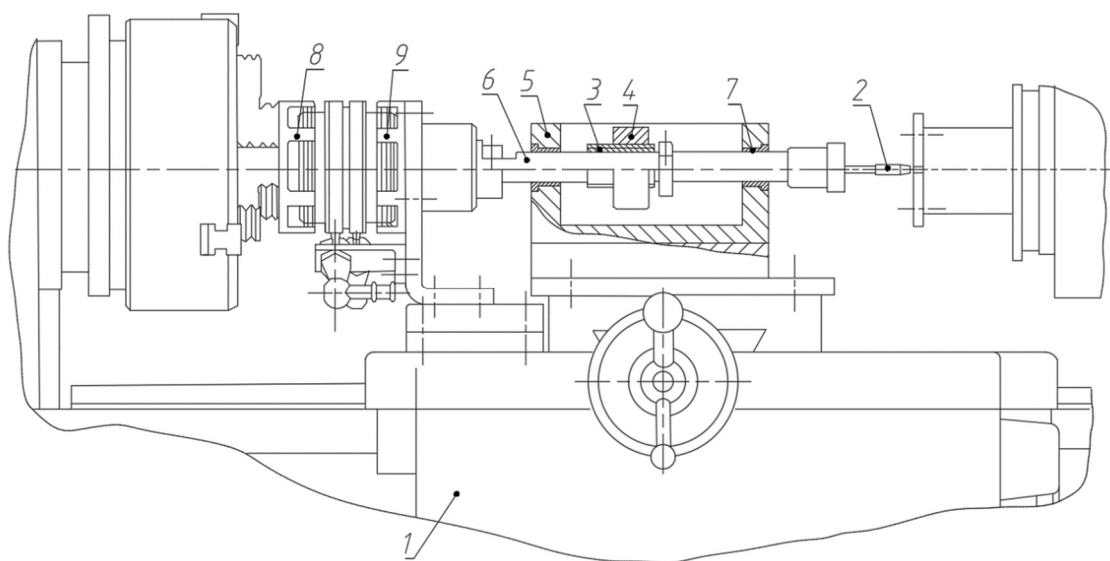


Рисунок 4 – Специальный шпиндельный узел

Для замера крутящих моментов при резбобразовании ( $M_{кр}$ ) однокомпонентный динамометр (рисунок 5) устанавливали в пиноли задней бабки станка. Динамометр содержит

корпус 1 и поворотный стол 2, вал которого закреплен на подшипниках 3 и связан посредством крестовины 4 с упругими элементами 5, выполненными в форме пластин (материал – сталь 65Г, HRC45...50). На плоскостях пружин наклеены проволочные тензорезисторы 6. Один конец каждой из пластин зафиксирован в корпусе 1, а другой помещен в пазы крестовины 4, при этом зазоры выбирают посредством винтов 7. Возможность защемления пластин 5 винтами 7 устраняют предварительным поджатием посредством спиральных пружин 8, регулируемых с помощью винтов 9. Для предотвращения перегрузок пластин 5 использованы ограничительные винты 10.

На столе динамометра располагали устройство для позиционирования и фиксации технологических образцов (рисунок 6). На диске 1 установлена электромагнитная муфта 2. Технологические образцы 3 из исследуемых материалов с предварительно обработанными цилиндрическими отверстиями под резьбу крепятся к стойкам 4, выполненным на диске 5. Для совмещения оси обрабатываемого отверстия с осью метчика выдвигали пиноль задней бабки станка с динамометром и устройством для закрепления образцов до ввода заборного участка метчика в отверстие, затем включали электромагнитную муфту 2, закрепляя тем самым технологический образец неподвижно относительно стола динамометра. Отводили пиноль задней бабки в исходное положение и фиксировали ее. Таким образом, совмещенные оси обрабатываемого отверстия и метчика обеспечивали возможность проведения исследований потоков отказов инструмента в лабораторных условиях.

Электрическая блок-схема установки приведена на рисунке 7. Проволочные тензорезисторы  $R_1$  и  $R_2$  связаны в мостовую схему и присоединены к тензометрическому усилителю. Регистрацию возникающих в процессе резбобработки электрических сигналов производили с помощью самопишущего прибора.

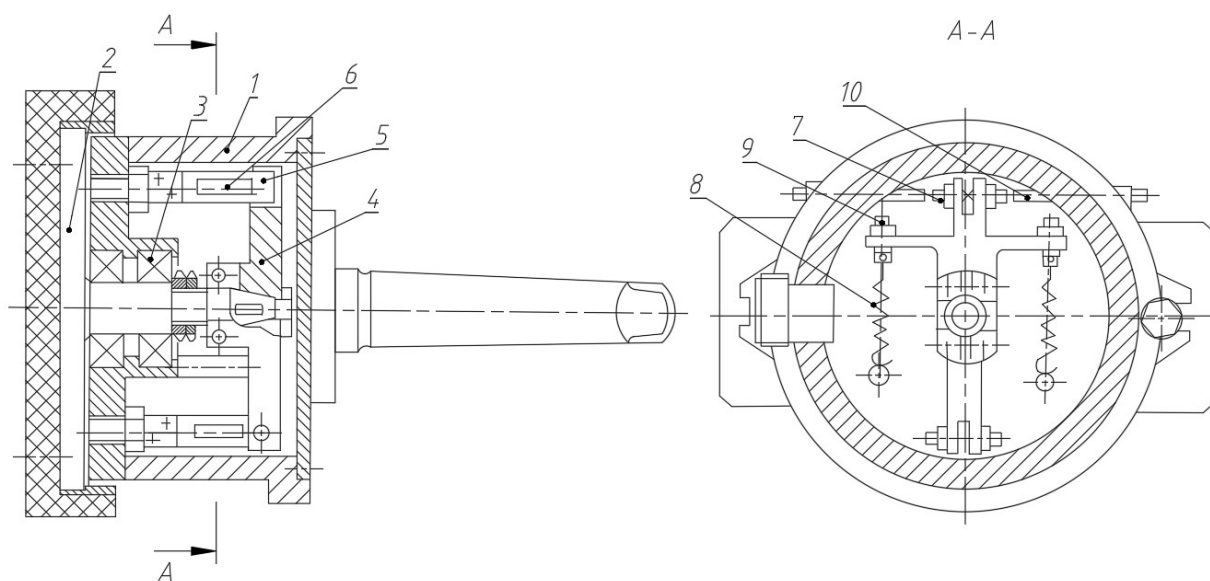


Рисунок 5 – Динамометр для измерения крутящего момента при резбобработании

Тарировку измерительной и записывающей аппаратуры осуществляли периодически (перед каждой серией опытов). Масштаб тарировки определялся аппроксимацией по методу наименьших квадратов. Взаимное влияние каналов усилителя составляло не более 2 %, погрешность измерительного канала самопишущего прибора – 8 %, а погрешность измерения на миллиметровой бумаге самописца амплитуд сигналов – 2...5 %. Общая погрешность при использовании методики не превышала 12 %.

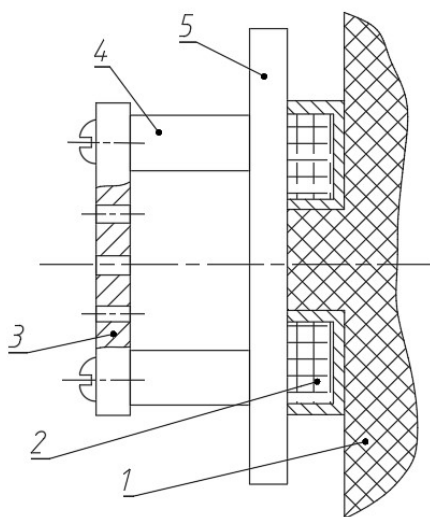


Рисунок 6 – Устройство для позиционирования и фиксации технологических образцов

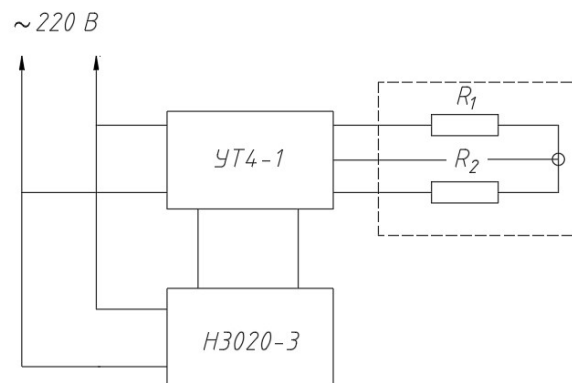


Рисунок 7 – Электрическая блок-схема экспериментальной установки

Методика исследования эксплуатационной надежности резбонарезного оборудования с учетом большого числа различных факторов достаточно сложна и трудоемка [8]. С целью исследования интенсивностей отказов функционирования и интенсивностей восстановления метчиков необходимо провести в лабораторных условиях полный факторный эксперимент типа  $2^n$  для выявления экспериментальных условий функционирования элементов модулей.

Пользуясь таким планированием, можно представить исследуемую зависимость  $\eta(x)$ ,  $x=(x_1, x_2, \dots, x_n)$  в виде полинома:

$$\eta(x) = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \sum \beta_{ij} x_i x_j + \sum \beta_{ijk} x_i x_j x_k + \dots, \quad (1)$$

$$1 \leq i < j \leq n; 1 \leq i < j < k \leq n,$$

где  $\{\beta\}$  – коэффициент уравнения регрессии.

Учитывая, что надежность метчиков определяется в первую очередь прочностью обрабатываемого материала, скоростью резбоформирования и диаметром отверстия, рассмотрим задачу по определению зависимости стойкости метчиков от перечисленных факторов: прочности обрабатываемого материала  $\sigma(x_1)$ , скорости резбообработки  $V(x_2)$  и диаметра отверстия  $d(x_3)$ , то есть

$$Y = T_H = f(x_1, x_2, x_3). \quad (2)$$



Рисунок 8 – Конструкции пластически-деформирующего (а) метчика (ПДМ) и режуще-деформирующих (б) метчиков (РДМ)

Для испытаний брали трехгранные затылованные пластически деформирующие метчики (ПДМ, рисунок 8, а), машинно-ручные метчики (МРМ) (ГОСТ1604-71) и затылованные режуще-деформирующие метчики (РДМ, рисунок 8, б), изготовленные из стали Р9К5 (ГОСТ 19265-73) с твердостью рабочей части HRC 62...65. Максимальная прочность

обрабатываемого материала (ВТ 3) принята равной  $\sigma_B=10^{-3}H/m^2$ , минимальная  $\sigma_B=0,6 \times 10^{-3}H/m^2$  (сталь 34ХНЗМ). Скорость резбобработки изменяли от 0,042 до 0,15 м/с. Диаметры отверстия под резьбу М4 изменяли для ПДМ в диапазоне от 3,30 до 3,50 мм. Значения остальных параметров принимали постоянными.

Условия планирования эксперимента с заданными границами, уровнями и шагами варьирования независимых переменных  $X_1, X_2, X_3$  в натуральном кодированном виде представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Условия планирования экспериментальных исследований метчиков на эксплуатационную надежность

Условия	$\sigma(x_1)$		$V(x_2)$		$d(x_3)$	
	$H/m^2$	код	$м/с$	код	$мм$	код
Уровень:						
Верхний	$10^{-3}$	+1	0,15	+1	3,76	+1
Нижний	$0,6 \times 10^{-3}$	+1	0,04	-1	3,62	-1
Основной	$0,8 \times 10^{-3}$	0	0,09	0	3,69	0
Шаг варьирования	$0,2 \times 10^{-3}$	–	0,05	–	0,07	–

План эксперимента – матрица планирования (таблица 3, левая часть), иллюстрирует уровни значений параметров, которые имели метчики в данной точке факторного пространства.

Обрабатывали сквозные резьбовые отверстия размером М4 в заготовках из сталей 34ХНМЗ ( $\sigma_B=0,6 \times 10^{-3}H/m^2$ ), 12Х21НЗТ ( $\sigma_B=0,7 \times 10^{-3}H/m^2$ ), ВЖ36-Д2 ( $\sigma_B=0,8 \times 10^{-3}H/m^2$ ). В качестве смазывающе-охлаждающего технологического средства (СОТС) использовали сульфозфрезол (ГОСТ 122-84).

Таблица 3 – Матрица планирования и результаты эксперимента

Планирование			Стойкость инструмента $T_{II}$ , мин				$S_{yu}^2$
$X_1$	$X_2$	$X_3$	$Y_{II1}$	$Y_{II2}$	$Y_{III}$	$Y=(Y_{II})$	
–	–	–	14,1	14,2	13,7	14,0	0,07
+	–	–	1,7	1,6	1,8	1,7	0,02
–	+	–	3,9	4,1	3,8	3,9	0,03
+	+	–	0,8	0,9	0,7	0,8	0,02
–	–	+	14,5	14,6	14,4	14,5	0,01
+	–	+	1,7	1,5	1,9	1,7	0,04
–	+	+	4,1	3,8	4,2	4,1	0,05
+	+	+	0,9	0,7	1,1	0,9	0,02
$\sum S_{yu}^2 = 0,26$							

Средний и внутренний диаметры обработанной резьбы контролировали гладкими и резьбовыми калибрами. Для оценки эксплуатационной надежности метчиков определяли их суммарную стойкость, то есть время от начала работы до поломки зубьев рабочей части или стержня метчика. Суммарная стойкость (наработка на отказ) определяется по формуле:

$$T_{II}=k_0h/n_{ш}P_M, \quad (3)$$

где  $k_0$  – количество обработанных резьбовых отверстий;  $h$  – глубина отверстия, мм;  $n_{ш}$  – частота вращения шпинделя,  $мин^{-1}$ ;  $P_M$  – шаг резьбы метчика, мм.

В правой части таблицы 3 приведены результаты испытаний ПДМ, когда значения исследуемых параметров обработки ( $\sigma_B, V, d$ ) составили восемь различных комбинаций, указанных в матрице планирования.

В результате дисперсионного анализа результатов эксперимента окончательное искомое уравнение зависимости имеет вид:

$$Y(X) = 2,964 - 6,473X_1 + 4,765X_2 + 3,699X_3. \quad (4)$$

Для нахождения оптимальных параметров при наличии уравнения (4) применяли метод крутого восхождения по поверхности отклика (таблица 4). В первой строке таблицы 4 указаны значения коэффициентов уравнения регрессии. Затем вычисляли произведения коэффициентов  $b_i$  на интервал варьирования  $\Delta(x)$  (вторая строка). Максимальное значение имело произведение  $b_{ix}\Delta(x_2) = 15,48$ , которое и было принято за базовое.

Таблица 4 – Результаты испытаний метчиков на эксплуатационную надежность

Исследуемые факторы	$\sigma_B, \text{Н/м}$	$V, \text{м/с}$	$d, \text{мм}$	$T, \text{мин}$
$b_i$	-6,473	0,08	3,69	—
$b_i \times \Delta$	$-1,3 \times 10^{-3}$	0,26	0,26	—
Шаг, $q$	$-0,08 \times 10^{-3}$	1	0,02	—
Опытные данные	$0,72 \times 10^{-3}$	0,11	3,71	14,63
	$0,64 \times 10^{-3}$	0,13	3,72	14,84

Для базового фактора  $X_2$  выбран шаг крутого восхождения  $q_2 = 1$ . Шаг для остальных факторов  $X_1$  и  $X_3$  находили по соотношениям:

$$q_1 = -1,3 \times 10^{-3} / 15,486 = -0,08 \times 10^{-3};$$

$$q_3 = 0,259 / 15,486 = 0,02.$$

Полученные шаги занесены в третью строку. В следующих строках показан процесс восхождения с реализацией опытов. Из анализа результатов испытаний следует, что стойкость метчиков повышается с уменьшением прочности обрабатываемого материала. Однако дальнейшее уменьшение прочности материала нецелесообразно, так как при значениях  $\sigma_B < 0,6 \times 10^{-3} \text{ Н/м}$  наблюдается выход за пределы диапазона труднообрабатываемых материалов, что противоречит условиям испытаний на надежность по экстремальному уровню. Поэтому значения параметров, записанные в последней строке, можно считать приемлемыми для результатов испытаний ПДМ: материал 12Х13 ( $\sigma_B < 0,6 \times 10^{-3} \text{ Н/м}^2$ ),  $V = 0,13 \text{ м/с}$ ,  $d = 3,72 \text{ мм}$ .

Полученные аналогичным образом (в результате факторного эксперимента) данные для машинно-ручных метчиков (МРМ) и режущо-деформирующих метчиков (РДМ) позволили выявить для них условия проведения испытаний на эксплуатационную надежность. Так, для варианта МРМ выбирали обрабатываемый материал 34ХН3М ( $\sigma_B < 0,58 \times 10^{-3} \text{ Н/м}^2$ ),  $V = 0,07 \text{ м/с}$ ,  $d = 3,24 \text{ мм}$ . Для варианта РДМ брали материал 12Х21Н5Т ( $\sigma_B < 0,7 \times 10^{-3} \text{ Н/м}^2$ ),  $V = 0,117 \text{ м/с}$ ,  $d = 3,34$ . Время между двумя отказами функционирования каждого метчика является случайной величиной, так как обусловлено случайными событиями (например, метчики, взятые из одной партии, имеют отличия по геометрическим параметрам, прочности, шероховатости поверхности, что сказывается на их стойкости). Исследования наработки на отказ метчиков ( $T'_{и}$ ) трех вариантов производили в течение месяца в лабораторных условиях с учетом параметров обработки и режимов, выбранных для каждой конструкции в процессе факторного эксперимента. Результаты статистического исследования указанных метчиков сведены в таблицу 5, где показаны математические ожидания  $M[T'_{и}]$  дискретных случайных величин времени  $T'_{и}$  между двумя отказами функционирования метчиков.

Дисперсия  $D[T'_{и}]$  при этом отличается от соответствующего математического ожидания на 2,5%, 6% и 11%, что дает возможность утверждать о распределении случайной величины  $T'_{и}$  по закону Пуассона. Для статистического описания процесса возникновения отказа рассчитывали относительные частоты распределения  $h(T'_{и})$ . На основании результатов вычислений строили графики относительных частот распределения для каждого варианта метчиков (рисунок 9).

Характерными причинами отказов функционирования метчиков машинно-ручных (МРМ) были поломки рабочей части, пластически деформирующих (ПДМ) – выкрашивание зубьев заборного участка и переходных зубьев между заборным и калибрующим участками.

Таблица 5 – Экспериментальные значения времени между отказами функционирования метчиков

Вариант метчика	Математическое ожидание, $M[T_n^I]$ , мин	Дисперсия, $D[T_n^I]$
Машинно-ручной	7,9	8,1
Пластически-деформирующий	14,6	13,7
Режуще-деформирующий	21,9	19,4

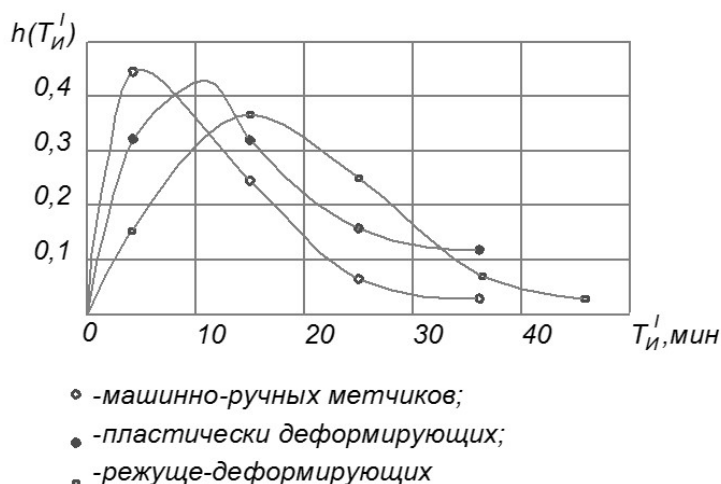


Рисунок 9 – Относительные частоты распределения времени между отказами функционирования метчиков

Режуще-деформирующие метчики (РДМ) по первой и по второй причинам выходили из строя примерно в равных соотношениях. При этом наиболее высокие показатели надежности (средняя наработка на отказ  $T_n^I = 22$  мин при работе с труднообрабатываемыми материалами) получены именно при использовании режуще-деформирующих метчиков.

Результаты исследований на экспериментальном стенде зависимостей крутящего момента  $M_{кр}$  от скорости резьбообработки метчиками М4 (МРМ, ПДМ и РДМ) и от диаметра начального отверстия представлены на графиках (рисунки 10, 11).

Исследования показали, что наибольшего значения крутящий момент  $M_{кр}$  достигает в период максимального контактирования зубьев метчика с обрабатываемым материалом. При глубине отверстия  $l = 2d$ , т.е.  $l = 4$  мм, было установлено, что крутящий момент  $M_{кр}$  при пластическом деформировании в 2,5 раза превышает этот показатель при работе режущих МРМ и в 1,4 раза – при работе РДМ. Предельное затупление каждого из вариантов метчиков сопровождалось ростом крутящих моментов  $M_{кр}$  до экстремальных значений  $M_{кр.э}$ , которые для режущих МРМ, ПДМ и РДМ превышали их  $M_{кр}$  соответственно в 1,6, 1,8 и 1,7 раз.

Наиболее характерными видами параметрических отказов режущих МРМ были наростообразование обрабатываемого материала на передних и боковых поверхностях зубьев, скалывание вершин зубьев, притупление кромок и оплавление кромок зубьев рабочей части. Для ПДМ было наиболее характерным явление наростообразования на заборном и калибрующем участках, износ витков резьбы на боковых сторонах профиля и по наружному диаметру. При работе РДМ на режущих участках наблюдались скалывание вершин и притупление кромок, а на деформирующих участках – наростообразование и скругление вершин зубьев.

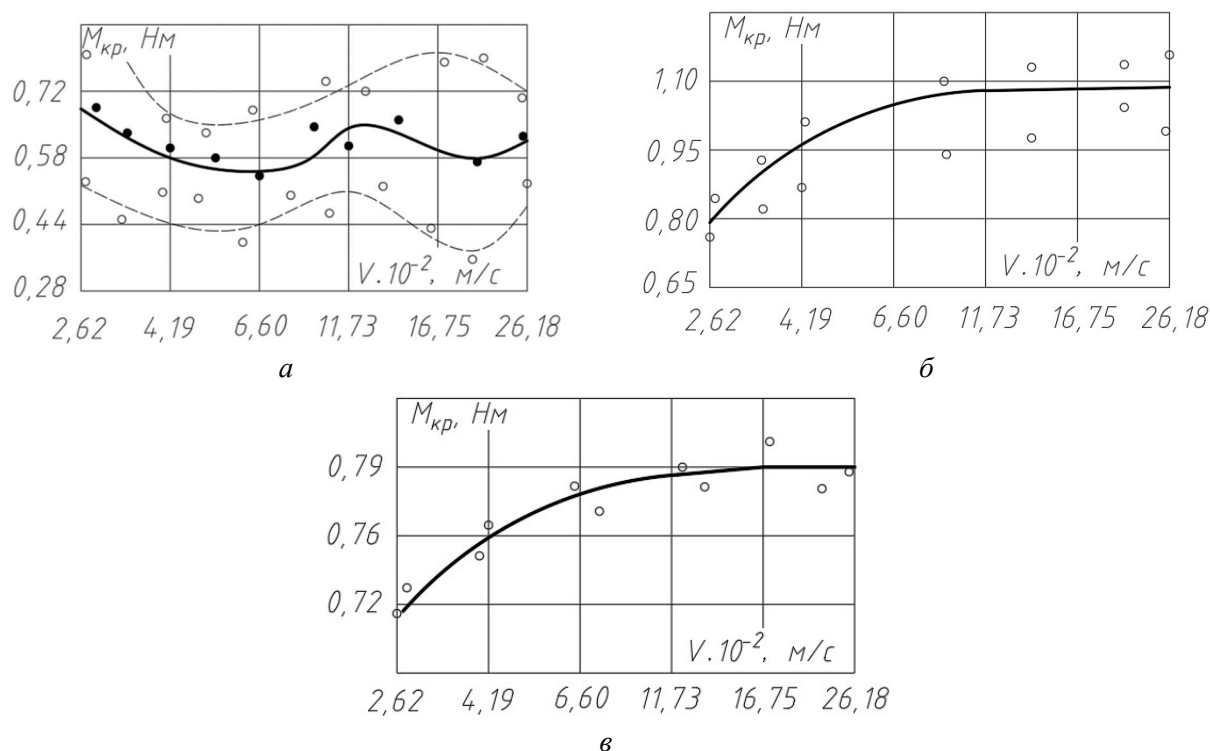


Рисунок 10 – Зависимости крутящего момента  $M_{кр}$  от скорости резьбообработки:

а – режущим МРМ; б – ПДМ; в – РДМ

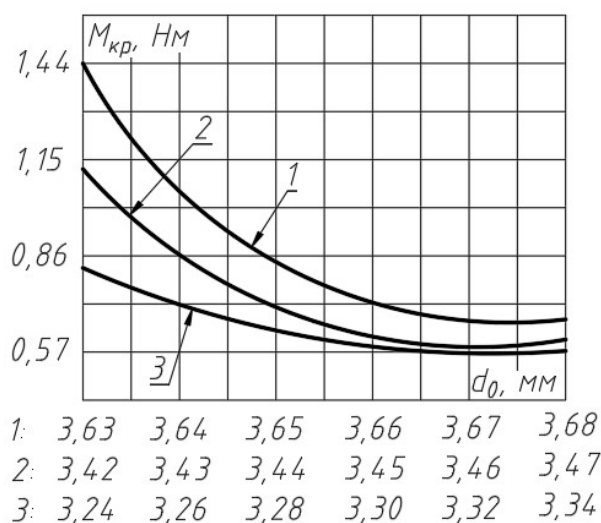


Рисунок 11 – Зависимости крутящего момента  $M_{кр}$  от диаметра начального отверстия:

1 – ПДМ; 2 – РДМ; в – режущим МРМ

### Заключение

Таким образом, на основе прогрессивного стандового оборудования и разработанной методики обеспечивается повышение эффективности экспериментальных исследований надежности затывованных мелкокоразмерных метчиков. Предельное затупление каждого из вариантов метчиков сопровождалось ростом крутящих моментов до экстремальных значений  $M_{кр.э}$ , которые для режущих МРМ, ПДМ и РДМ превышали их соответственно в 1,6, 1,8 и 1,7 раз. Наиболее характерными видами параметрических отказов режущих МРМ были наростообразование обрабатываемого материала на передних и боковых поверхностях зубьев, скалывание вершин зубьев, притупление кромок и оплавление кромок зубьев рабочей части. Для ПДМ было наиболее характерным явление наростообразования на заборном и



калибрующем участках, износ витков резьбы на боковых сторонах профиля и по наружному диаметру. При работе РДМ на режущих участках наблюдались скалывание вершин и притупление кромок, а на деформирующих участках – наростообразование и скругление вершин зубьев. Экспериментальные исследования подтверждают преимущество РДМ и ПДМ по сравнению с режущими МРМ не только по точности обработки резьбового отверстия, но также по их эксплуатационной надежности и экономической эффективности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Меньшаков В.М. Бесстружечные метчики / В.М. Меньшаков, Г.П. Урлапов, В.С. Середа. – М.: Машиностроение, 1976. – 167 с.
2. Рабкин А.Л. Затыловочные станки / А.Л. Рабкин. – М.: Машиностроение, 1976. – 128 с.
3. Якухин В.Б. Оптимальная технология изготовления резьб / В.Б. Якухин. – М.: Машиностроение, 1985. – 184 с.
4. Харченко А.О. Совершенствование процесса затылования зубьев рабочей части мелкоразмерных метчиков / А.О. Харченко, С.В. Корчевский. // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», 2023. № 6 (362). – С. 184-195. DOI: 10.33979/2073-7408-2023-362-6-184-195.
5. Братан С.М. Процессы и операции формообразования поверхностей при механической обработке: Учеб. пособие / С.М. Братан, Е.А. Владецкая, Е.А. Левченко и др. – М.: Центркаталог, 2018. – 200 с.
6. Братан С.М. Повышение точности формообразования мелкоразмерных резьб метчиками в алюминиевых сплавах / С.М. Братан, Ф.Н. Канареев, П.А. Новиков, А.О. Харченко. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2017. – 164 с.
7. Харченко А.О. Прогрессивные устройства и инструменты для мелкоразмерного резьбонарезания в отверстиях / А.О. Харченко, А.А. Харченко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», 2023. № 2 (358). – С. 35-41. DOI:10.33979/2073-7408-2023-358-2-35-41.
8. Харченко А.О. Практикум по научно-исследовательской деятельности в машиностроении / А.О. Харченко, С.М. Братан, А.А. Харченко, Е.А. Владецкая. – М.: Центркаталог, 2022. – 288 с.

**Харченко Александр Олегович**  
ФГАОУ ВО «Севастопольский  
государственный университет»,  
г. Севастополь  
Кандидат технических наук,  
профессор кафедры «Технология  
машиностроения»  
299053, г. Севастополь, ул.  
Университетская, 33  
Тел. 54-05-57  
E-mail: khao@list.ru

**Корчевский Сергей Викторович**  
ФГАОУ ВО «Севастопольский  
государственный университет», г.  
Севастополь  
Аспирант кафедры «Технология  
машиностроения»  
299053, г. Севастополь, ул.  
Университетская, 33  
Тел. +79782721499  
E-mail: LEV9456@yandex.ru

**Харченко Андрей Александрович**  
ФГАОУ ВО «Севастопольский  
государственный университет», г.  
Севастополь  
Кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Автомобильный  
транспорт»  
299053, г. Севастополь,  
ул. Университетская, 33  
Тел. +7 (8692) 54-35-70  
E-mail: a.a.kharchenko@sevsu.ru

A.O. KHARCHENKO, S.V. KORCHEVSKI, A.A. KHARCHENKO

## BENCH EQUIPMENT FOR STUDYING THE RELIABILITY OF RELIEDED SMALL-SIZED TAPS

**Abstract.** The article is devoted to the issues of conducting experimental studies of the reliability of taps backed by the radial feed method and taps whose teeth are obtained by the method of axial reciprocating movement of the backing tool. For testing, we took trihedral backed plastically deforming taps (PDT), machine-hand taps (MHT) and backed cutting-deforming taps (CDT). The extreme dullness of each of the tap options was accompanied by an increase in torque to extreme values of  $M_{кр.э}$ , which for cutting MHT, PDT and CDT exceeded them by 1,6, 1,8 and 1,7 times, respectively. The most typical types of parametric failures of cutting MRMs were build-up of the processed material on the front and side surfaces of the teeth, chipping of the tops of the teeth, blunting of the edges and melting of the edges of the teeth of the working part. For PDT, the most characteristic phenomenon was the formation of built-up edges in the intake and calibrating sections, wear of thread turns on the side sides of the profile and along the outer diameter. During the operation of the CDT, chipping of the tops and blunting of the edges were observed in the cutting areas, and build-up and rounding of the tops of the teeth were observed in the deforming areas. The presented results confirm the effectiveness

*of experimental studies of the reliability of small-sized taps based on advanced bench equipment and the developed methodology.*

**Keywords:** *small-sized tap, reliability of the tap, tolerance range of threaded profiles, control of wear, experimental setup, dynamometer, operational reliability of the tap.*

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Menshakov V.M. Besstruzhechnye metchiki (Unstructured taps) / V.M. Menshakov, G.P. Urlapov, V.S. Sereda. – M.: Mashinostroyeniye, 1976. – 167 s.
2. Rabkin A.L. Zatylovochnye stanki (Backing machines) / A.L. Rabkin – M.: Mashinostroyeniye, 1976. – 128 s.
3. Yakukhin V.B. Optimalnaya tehnologiya izgotovleniya rezb (Optimal thread manufacturing technology) / V.B. Yakukhin – M.: Mashinostroyeniye, 1985. – 184 s.
4. Kharchenko A.O. Sovershenstvovaniye protsessa zatylovaniya zubyev rabochey chasti melkorazmernykh metchikov (Improving the process of backing the teeth of the working part of small-sized taps) / A.O. Kharchenko, S.V. Korchevskiy. // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – Orel: FGBOU VO «OGU imeni I.S. Turgeneva», 2023. № 6 (362). – S. 184-195. DOI: 10.33979/2073-7408-2023-362-6-184-195.
5. Bratan S.M. Protsessy i operatsii formoobrazovaniya poverkhnostey pri mekhanicheskoy obrabotke (Processes and operations of forming surfaces during machining): Ucheb. posobiye / S.M. Bratan, Ye.A. Vladetskaya, Ye.A. Levchenko i dr. – M.: Tsentrkatalog, 2018. – 200 s.
6. Bratan S.M. Povysheniye tochnosti formoobrazovaniya melkorazmernykh rezb metchikami v alyuminiyevykh splavakh (Improving the accuracy of forming small-sized threads with taps in aluminum alloys) / S.M. Bratan, F.N. Kanareyev, P.A. Novikov, A.O. Kharchenko. – M.: Vuzovskiy uchebnik: INFRA-M, 2017. – 164 s.
7. Kharchenko A.O. Progressivnyye ustroystva i instrumenty dlya melkorazmernogo rezbbonarezaniya v otverstiyakh (Progressive devices and tools for small-size threading in holes) / A.O. Kharchenko, A.A. Kharchenko // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – Oryol: FGBOU VO «OGU imeni I.S. Turgeneva», 2023. № 2 (358). – S. 35-41. DOI: 10.33979/2073-7408-2023-358-2-35-41.
8. Kharchenko A.O. Praktikum po nauchno-issledovatel'skoy deyatel'nosti v mashinostroyenii (Workshop on research activities in mechanical engineering) / A.O. Kharchenko, S.M. Bratan, A.A. Kharchenko, E.A. Vladetskaya. – M.: Tsentrkatalog, 2022. – 288 s.

**Kharchenko Alexander Olegovich**  
"Sevastopol State University",  
Sevastopol  
Ph.D., professor of the department  
"Technology of mechanical engineering"  
299053, Sevastopol, Universitetskaya  
St., 33  
Тел. 54-05-57  
E-mail: khao@list.ru

**Korchevski Sergey Viktorovich**  
"Sevastopol State University",  
Sevastopol  
Postgraduate student of the  
department "Technology of  
mechanical engineering"  
299053, Sevastopol,  
Universitetskaya St., 33  
Тел. +79782721499  
E-mail: LEV9456@yandex.ru

**Kharchenko Andrey Aleksandrovich**  
"Sevastopol State University", Sevastopol  
PhD, Associate Professor of the  
department "Automobile Transport"  
299053, Sevastopol, Universitetskaya St.,  
33  
Tel. +7 (8692) 54-35-70  
E-mail: a.a.kharchenko@sevsu.ru

© А.О. Харченко, С.В. Корчевский, А.А. Харченко, 2024

В.И. ПАХАЛЮК, А.М. ПОЛЯКОВ, А.И. РЫЖКОВ

## ИННОВАЦИОННЫЙ МЕХАТРОННЫЙ СТЕНД-СИМУЛЯТОР ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ТОТАЛЬНЫХ ЭНДОПРОТЕЗОВ ТАЗОБЕДРЕННОГО СУСТАВА НА ИЗНОС

**Аннотация.** В данной работе обсуждается разработка и изготовление усовершенствованного опытного образца мехатронного стенда-симулятора для сертификационных испытаний эндопротезов тазобедренного сустава на износ, позволяющих создать законченное производство эндопротезов тазобедренного сустава в РФ. В качестве приводов в стенде применены электромеханические цилиндры с шариковинтовой парой для обеспечения большой длительности испытаний. Выполнены конечно-элементные расчеты рамной конструкции стенда для достижения необходимой ее жесткости. Обеспечена конструктивно универсальность стенда по возможности испытаний широкого ряда размеров эндопротезов, а также их типов.

**Ключевые слова:** мехатронный стенд для испытания суставов на износ, тотальный эндопротез тазобедренного сустава.

### Введение

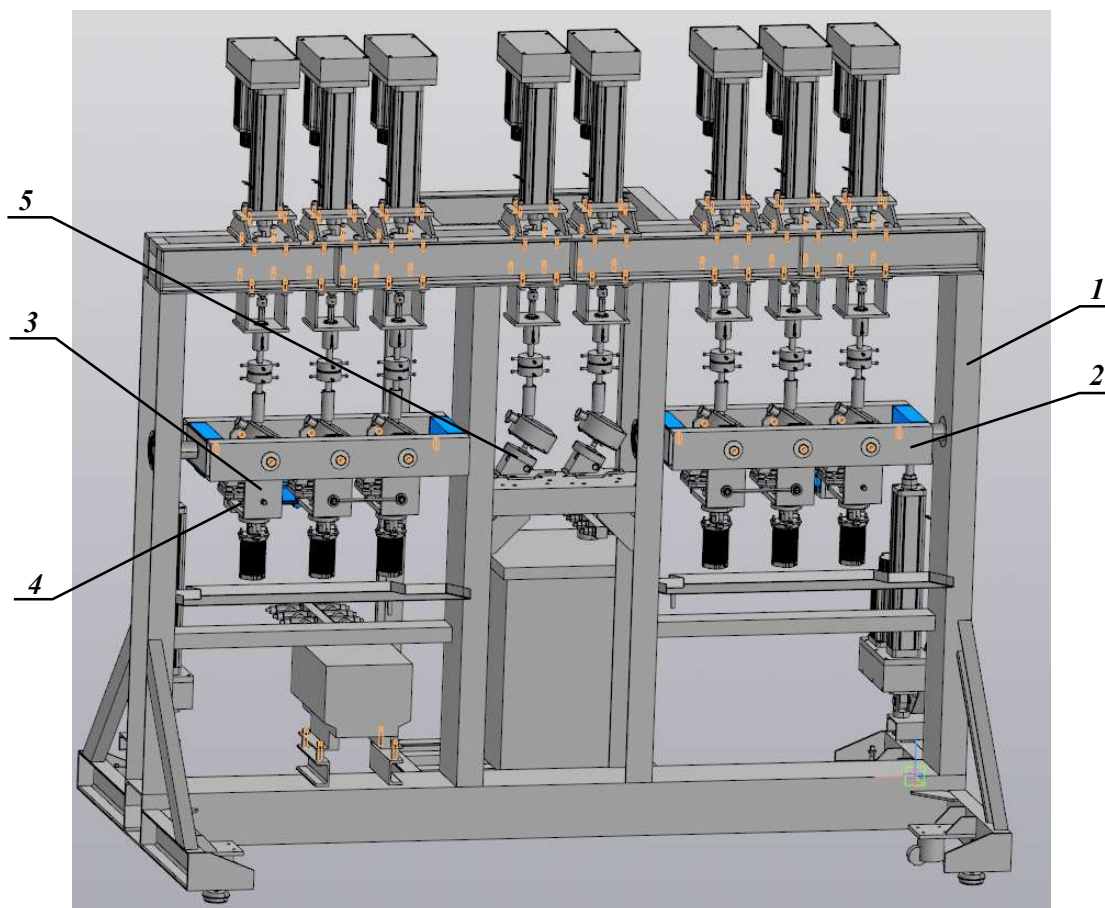
В настоящее время отмечается рост заболеваний естественных крупных суставов человека и, в частности, тазобедренного сустава, которые вызваны рядом неблагоприятных факторов как техногенного, так и экологического характера, что способствует омоложению его болезней. При невозможности лечения этих болезней терапевтическими методами прибегают к радикальному методу, который заключается в тотальной замене естественного сустава на искусственный имплантат, называемый тотальным эндопротезом тазобедренного сустава (ТЭТБС), и количество таких замен тем самым существенно возрастает [1]. До недавних пор на отечественный рынок более 90% ТЭТБС поставлялись несколькими крупными зарубежными компаниями, а отечественные ТЭТБС изготавливались лишь в небольшом количестве несколькими мелкими предприятиями, и продажа которых вызывала серьезные трудности. Это объяснялось тем, что для осуществления поставок эндопротезов на рынок необходимо наличие документов по их сертификационным испытаниям и, в частности, испытаниям на износ механическим способом на стендах-симуляторах, которые не были в наличии у отечественных производителей из-за отсутствия таковых у них. В РФ испытания на таких устройствах должны быть регламентированы требованиями отечественного стандарта ГОСТ Р ИСО 14242-1-2020 [2]. Учитывая необходимость импортозамещения в поставках ТЭТБС на отечественный рынок, возникает острая необходимость в создании таких стендов-симуляторов.

Единственный прототип в РФ такого мехатронного стенда-симулятора (МСС) на электромеханических управляемых осях, удовлетворяющий требованиям указанного стандарта, был разработан и изготовлен в Севастопольском государственном университете [3]. Но он обладает рядом существенных недостатков, которые должны быть устранены при разработке усовершенствованного опытного образца МСС. Целью настоящей работы является разработка и изготовление усовершенствованного опытного образца МСС для сертификационных испытаний эндопротезов тазобедренного сустава на износ, позволяющих создать законченное производство эндопротезов тазобедренного сустава в РФ. В нем также должны использоваться электромеханические приводы, и он должен обладать универсальностью по возможности испытания широкого ряда существующих размеров эндопротезов и их типов.

### Основная часть

За основу разработанного усовершенствованного МСС была принята конструктивная схема уже существующего стенда-симулятора [3], так как она при анализе его работы показала очень хорошие результаты удовлетворения требований стандарта [2] по кинематическим характеристикам для обеспечения движений сгибания-разгибания, приведения-отведения и внутреннего-внешнего вращения. Но применяемые в нем электромеханические оси для создания осевой силы оказались недостаточной мощности и на частоте работы в 1 Гц, которая

регламентирована указанным стандартом, стенд входил в резонанс. Более того электромеханические оси содержали зубчатую ременную передачу, которая является упругим звеном, и в результате создавался определенный люфт, отражавшийся на величине генерируемой осевой силы. Вместе с тем в конструкции стенда не была предусмотрена его универсальность по возможности испытания эндопротезов как по диапазону размеров, так и по их типам. В усовершенствованной конструкции МСС для обеспечения кинематических перемещений и создания осевой силы применены в качестве приводов управляемые электромеханические цилиндры с шариковинтовой парой. Они обеспечивают получение высокой точности по величине перемещения, его скорости, а также по генерированию величины силы. На рисунках 1-2 представлена 3D модель усовершенствованного стенда-симулятора.



*Рисунок 1 – 3D модель усовершенствованного стенда-симулятора (вид спереди)*

Стенд-симулятор представляет собой сварную рамную конструкцию 1, состоящую из двух испытательных блоков, выстроенных последовательно в одну линию. Каждый блок в свою очередь включает в себя прямоугольную рамную конструкцию 2 с тремя подвижными испытательными станциями, которая имеет возможность совершать колебательные движения относительно продольной горизонтальной неподвижной оси стенда (FE), обеспечивая моделирование разгибание-сгибание бедра. Каждая из подвижных испытательных станций помещена в U-образный кронштейн 3, имеющий возможность качания в направлении поперечной подвижной оси, моделирующей приведение-отведение бедра (АА. В U-образном кронштейне установлен стакан 4 с возможностью поворота относительно вертикальной подвижной оси (IOR), который содержит бедренный компонент эндопротеза с головкой, центр которой помещен на пересечении упомянутых трех взаимно перпендикулярных осей вращения).

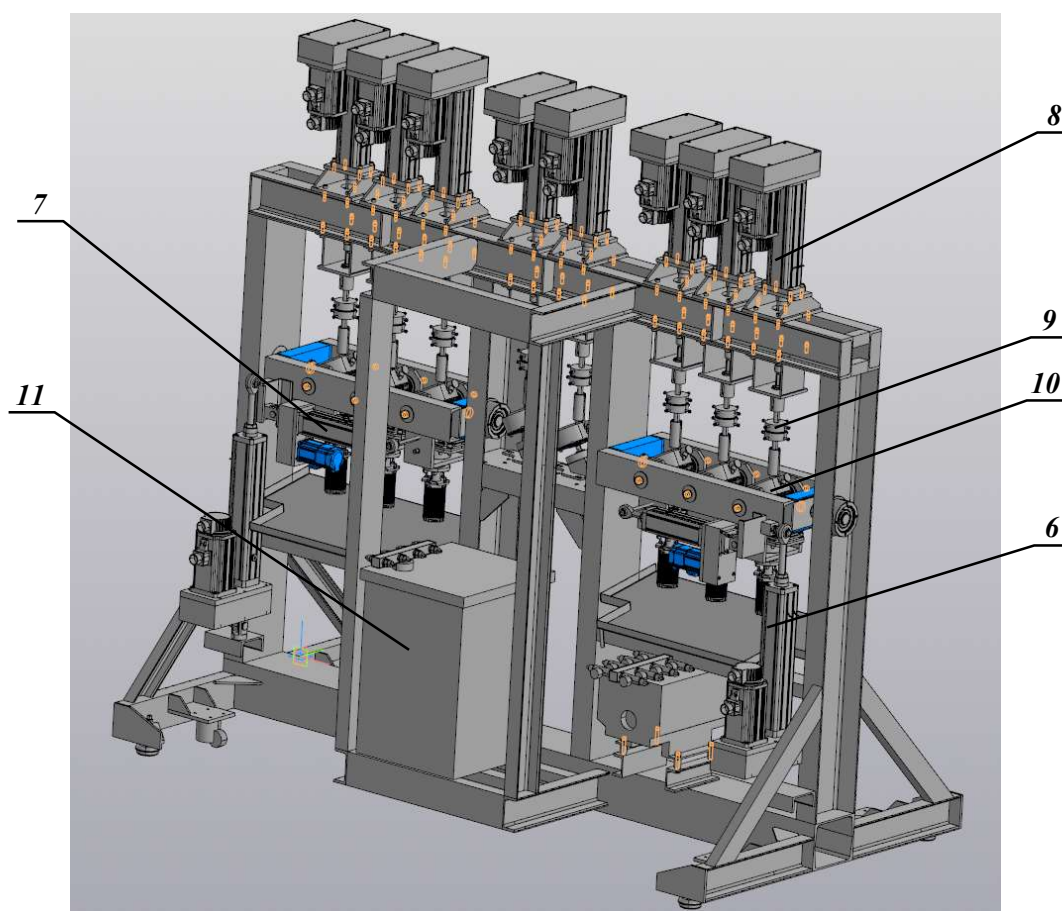


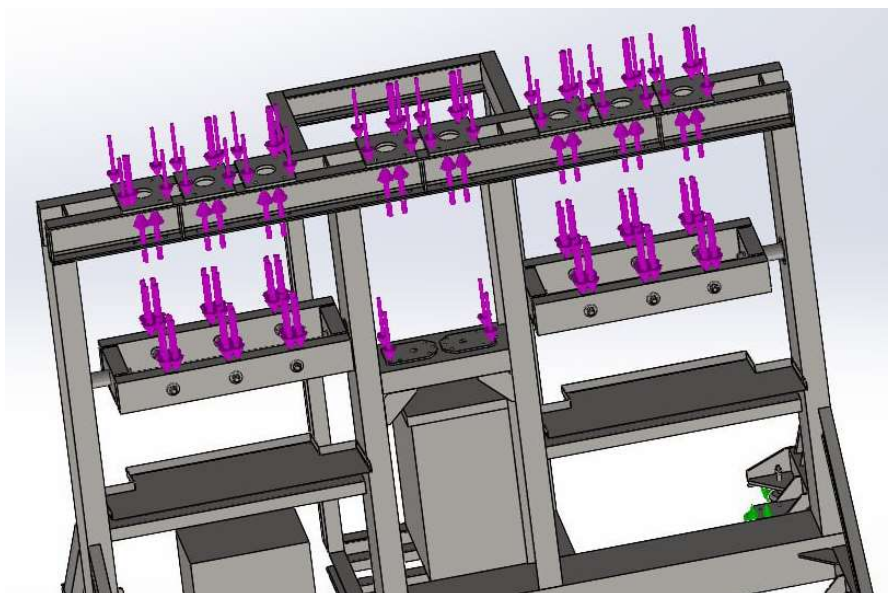
Рисунок 2 – 3D модель усовершенствованного стенда-симулятора (вид сзади)

Стенд содержит также две неподвижные станции 5 (по одной на каждый блок) для испытания на намокание, при наличии в конструкции эндопротеза полимерной вставки.

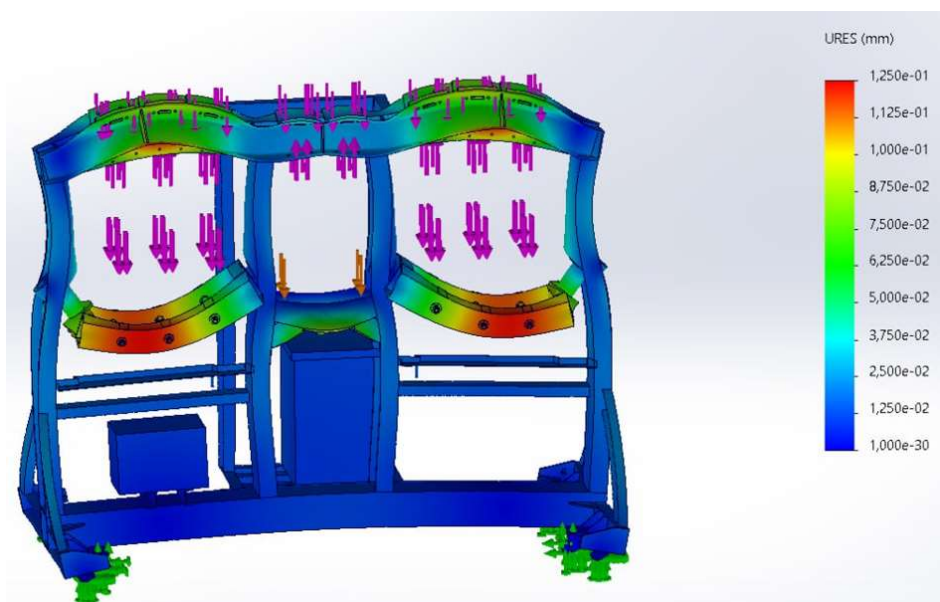
В каждом блоке колебательное движение прямоугольной рамной конструкции 2 вокруг оси FE обеспечивается своим электромеханическим цилиндром 6. А все три, находящиеся в ней U-образные кронштейны, кинематически соединены между собой посредством тяг. Это позволяет осуществить одновременное вращательное движение этих соединенных U-образных кронштейнов вокруг оси AA от одного привода посредством аналогичного электромеханического цилиндра 7, имеющимся в наличии в каждом блоке. Вертикальная нагрузка на каждой станции генерируется посредством сжатия пружины штоком электромеханического цилиндра 8 и передается через вертикальную тягу с встроенной муфтой 9 к неподвижному вертлужному компоненту (чашке) испытуемого эндопротеза, находящемуся в держателе 10, и через него на сферическую головку бедренного компонента. Наличие муфты необходимо для обеспечения само центрирования вертлужного компонента по отношению к головке эндопротеза. Испытуемый эндопротез на каждой станции находится в защищенном стакане, выполненном из литейного силикона, заполненном жидкостью для испытания с постоянной температурой, рециркулируемую насосом из бака 11.

При проектировании рамных конструкций стенда необходимо было учитывать приведенный в стандарте допустимый диапазон изменения осевой силы, который составляет  $\pm 90$  Н при пиковой ее величине 3000 Н. Исходя из этого, суммарная деформация всей рамной конструкции в данном случае не должна изменять величину сжатия пружины нагрузки, которая бы имела возможность генерировать значение силы по модулю более 90 Н. С этой целью был выполнен конечно-элементный анализ рамной конструкции стенда для определения величины ее общей деформации. На рисунке 3 представлена схема нагружения указанной конструкции осевой силой на каждую испытательную станцию величиной 3000 Н, а на рисунке 4 – картина результата расчета общей деформации при данном нагружении, которая показывает, что необходимая жесткость конструкции обеспечивается.





*Рисунок 3 – Схема нагружения стенда максимальной осевой силой на каждой станции*



*Рисунок 4 – Изображение результата расчета общей деформации конструкции при данном нагружении*

Одним из главных факторов новизны конструкции стенда-симулятора выступает универсальность его держателя вертлужного компонента эндопротеза, который позволяет обеспечить испытание широкого ряда размеров эндопротезов, а также их типов. Это достигается тем, что вертлужный компонент выполнен составной из трех собираемых свободно друг в друга элементов со взаимно сопряженными контактными поверхностями (рисунки 5-6). Он включает в себя наружный держатель 12, выполненный с внутренней полостью, имеющей, например, коническую форму контактной поверхности, в которую помещен промежуточный элемент 13, с наружной формой, повторяющей форму внутренней контактной поверхности наружного держателя. Промежуточный элемент содержит также внутреннюю полость с возможностью ее выполнения различных размеров, имеющей такую же форму контактной поверхности, в которую помещен внутренний элемент 14 с формой наружной поверхности, повторяющей форму внутренней контактной поверхности промежуточного элемента. Внутренний элемент в свою очередь содержит внутреннюю полость, повторяющую форму наружной поверхности вертлужного компонента эндопротеза (чашки), в котором чашка 15 и закрепляется. Причем все элементы вертлужного компонента всегда фиксированы в одном и том же положении относительно друг друга за счет

выполненных на их торцах с диаметрально противоположных сторон различной ширины пазов 16 и закрепляются крышкой 17, имеющей на своей поверхности ответные выступы 18, которые входят в эти пазы на указанных элементах, фиксируя их в одном и том же положении и предотвращая их относительное смещение.

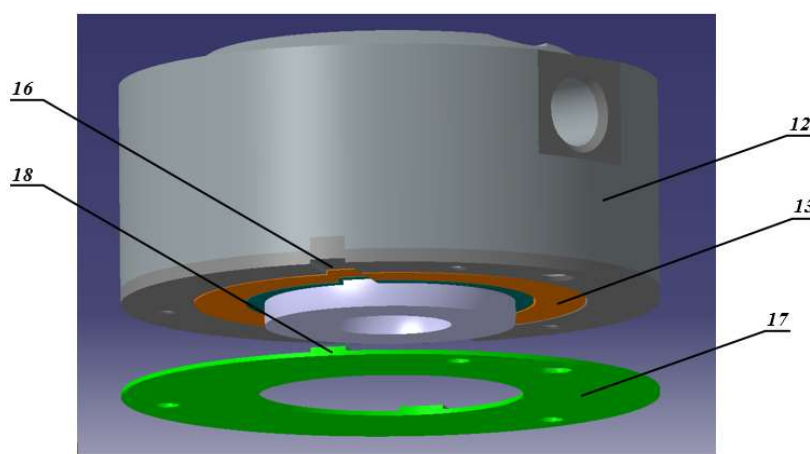


Рисунок 5 – 3D модель держателя вертлужного компонента эндопротеза (чашки) в сборе

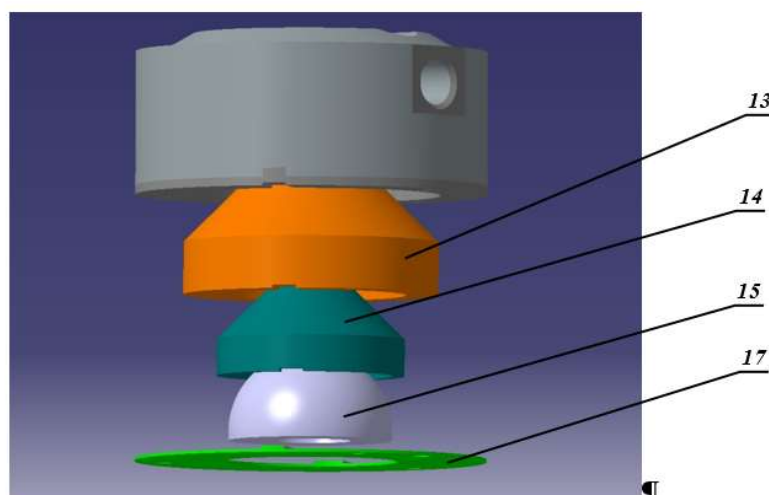


Рисунок 6 – 3D модель держателя вертлужного компонента в разобранном виде

Таким образом, меняя относительные размеры внутренних и наружных поверхностей промежуточного и внутреннего элементов держателя можно устанавливать чашки эндопротеза с широким диапазоном их диаметров, а также типов.

В результате выполненных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ был изготовлен опытный образец мехатронного стенда-симулятора (МСС) для испытания тотальных эндопротезов тазобедренного сустава (ТЭТБС) на износ, который показан на рисунке 7, а на рисунке 8 представлен стакан испытательной станции, в котором находится испытуемый эндопротез в жидкости для испытания.

### Заключение

Рассмотрена разработка и изготовление усовершенствованного опытного образца мехатронного стенда-симулятора для сертификационных испытаний эндопротезов тазобедренного сустава на износ, позволяющих создать законченное производство эндопротезов тазобедренного сустава в РФ. В качестве приводов в стенде применены электромеханические цилиндры с шариковинтовой парой, которые позволяют обеспечить большую длительности испытаний (по ГОСТ до 5 мл. циклов и не менее 20 их дальнейших повторений). Выполнены конечно-элементные расчеты рамной конструкции стенда для достижения необходимой ее жесткости. Обеспечена конструктивно универсальность стенда



по возможности испытаний широкого ряда размеров эндопротезов, а также их типов.



*Рисунок 7 – Общий вид изготовленного МСС для испытания ТЭТБС на износ*



*Рисунок 8 – Стакан испытательной станции с испытуемым эндопротезом внутри*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Poliakov, A. Current Trends in Improving of Artificial Joints Design and Technologies for Their Arthroplast y / A. Poliakov, V. Pakhaliuk, V.L. Popov // *Frontiers in Mechanical Engineering*. – 2020. – Vol. 6. – Art. 4. – 16 p.
2. ГОСТ Р ИСО 14242-1-2020. Имплантаты для хирургии. Износ тотальных эндопротезов тазобедренног о сустава: параметры нагружения и перемещения для испытательных машин и условия окружающей среды при испытании [Электронный ресурс]. – Электрон. данные (175276 bytes). – Режим доступа:

[https://allgosts.ru/11/040/gost\\_r\\_iso\\_14242-1-2020](https://allgosts.ru/11/040/gost_r_iso_14242-1-2020) Friday, 24 May 2024 10:55.

3. Пахалюк В.И., Поляков А.М. Отечественное моделирующее устройство для испытания тотальных эндопротезов тазобедренного сустава на износ / В.И. Пахалюк, А.М. Поляков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2019. – № 4-1 (336). – С. 123–129.

**Пахалюк Владимир Иванович**  
ФГАОУ ВО «Севастопольский  
государственный  
университет»,  
канд. техн. наук, доцент, ведущий  
научный сотрудник научной  
лаборатории «Биомеханика»,  
ул. Университетская 33, г.  
Севастополь, 299053  
Тел. +7 978 764 06 00  
E-mail: pahaluk@mail.sevsu.ru

**Поляков Александр Михайлович**  
ФГАОУ ВО «Севастопольский  
государственный университет»,  
канд. техн. наук, доцент, ведущий  
научный сотрудник научной  
лаборатории «Биомеханика»,  
ул. Университетская 33, г.  
Севастополь, 299053  
Тел. +7 978 703 88 26  
E-mail:  
a.m.poljakov@mail.sevsu.ru

**Рыжков Александр Игоревич**  
ФГАОУ ВО «Севастопольский  
государственный  
университет»,  
канд. техн. наук,  
доцент кафедры «Цифровое  
проектирование»,  
ул. Университетская 33, г.  
Севастополь, 299053  
Тел. +7 978 847 37 49  
E-mail: airyzhkov@mail.sevsu.ru

V.I. PAKHALIUK, A.M. POLIAKOV, A.I. RYZHKOV

## INNOVATIVE MECHATRONIC SIMULATOR BENCH FOR WEAR TESTING OF TOTAL HIP JOINT ENDOPROSTHESES

**Abstract.** *This paper discusses the development and production of an improved prototype of a mechatronic simulator bench for certification wear testing of hip joint endoprostheses, allowing for the creation of a complete production of hip joint endoprostheses in the Russian Federation. Electromechanical cylinders with a ball screw pair are used as drives in the bench to ensure long testing duration. Finite element calculations of the bench frame structure were performed to achieve the required rigidity. The bench design is carried out to ensure the versatility of testing a wide range of endoprostheses sizes, as well as their types.*

**Keywords:** *mechatronic bench for joints wear testing, total hip joint endoprosthesis.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Poliakov, A. Current Trends in Improving of Artificial Joints Design and Technologies for Their Arthroplasty / A. Poliakov, V. Pakhaliuk, V.L. Popov // *Frontiers in Mechanical Engineering*. – 2020. – Vol. 6. – Art. 4. – 16 p.
2. GOST R ISO 14242-1-2020. Implantaty dlya khirurgii. Iznos totalnykh endoprotezov tazobedrennogo sustava: parametry nagruzheniya i peremeshcheniya dlya ispytatelnykh mashin i usloviya okruzhayushchey sredy pri ispytanii [Elektronnyy resurs]. – Elektron. dannyye (175276 bytes). Rezhim dostupa: [https://allgosts.ru/11/040/gost\\_r\\_iso\\_14242-1-2020](https://allgosts.ru/11/040/gost_r_iso_14242-1-2020) Friday, 24 May 2024 10:55.
3. Pakhaliuk V.I., Poliakov A.M. Otechestvennoye modeliruyushcheye ustroystvo dlya ispytaniya totalnykh endoprotezov tazobedrennogo sustava na iznos / V.I. Pakhaliuk, A.M. Polyakov // *Fundamentalnyye i prikladnyye probleme my tekhniki i tekhnologii*. – 2019. – № 4-1 (336). – S. 123–129.

**Pakhaliuk Vladimir Ivanovich**  
FSAEI HE “Sevastopol State  
University”,  
Ph.D., Associate Professor,  
Leading researcher of the  
"Biomechanics" research  
laboratory,  
Universitetskaya Str. 33,  
Sevastopol, 299053  
Phone: +7 978 764 06 00  
E-mail: pahaluk@mail.sevsu.ru

**Poliakov Aleksandr Mikhailovich**  
FSAEI HE “Sevastopol State  
University”,  
Ph.D., Associate Professor, Leading  
researcher of the "Biomechanics"  
research laboratory,  
Universitetskaya Str. 33, Sevastopol,  
299053  
Phone: +7 978 703 88 26  
E-mail: a.m.poljakov@mail.sevsu.ru

**Ryzhkov Aleksandr Igorevich**  
FSAEI HE “Sevastopol State  
University”,  
Ph.D., Associate Professor,  
Universitetskaya Str. 33, Sevastopol,  
299053  
Тел. +7 978 847 37 49  
E-mail: airyzhkov@mail.sevsu.ru

© В.И. Пахалюк, А.М. Поляков, А.И. Рыжков, 2024

Д.В. МОИСЕЕВ, Ю.В. ДОРОНИНА

## МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ РАЗВИВАЮЩЕЙСЯ СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ

**Аннотация.** Рассматривается проблема развития систем постоянного функционирования; показано, что реализация требований к такой системе должна выполняться в процессе работы системы. Предложена модель классификации динамических требований к развивающейся системе на основе априорного соотношения оценки времени реализации требования (периода) со временем цикла функционирования сложной системы. Предложена постановка задачи оптимального проектирования мониторинговой системы при условии классификации динамических требований.

**Ключевые слова:** динамические требования, развивающаяся система, реинжиниринг, сложная система.

### Введение

Процесс разработки сложной системы представляет собой известную последовательность процедур, описанную различными моделями в рамках разнообразных жизненных циклов: каскадного, водопадного, спирального, инкрементного, V-образного и других [1-2]. Модель жизненного цикла описывает последовательности (множества) процессов различных типов, включенных в этапы реализации системы [3-4]. Этап развития или совершенствования в большинстве случаев является одним из этапов, включенных в жизненный цикл каждого типа.

Особую сложность при проектировании представляют собой системы непрерывного мониторинга (СНМ). Области, в которых применяются СНМ следующие: мониторинг параметров систем высокой готовности, гидрометеорологические процессы, процессы наблюдения за техническими объектами критического применения и другие. Для таких систем совершенствование (развитие) должно осуществляться параллельно с непрерывной работой [5].

Существующие научные исследования, в основном, касаются или подробного описания процесса проектирования, или ограничиваются идеями совершенствования сложных систем в целом [6-16]. В ряде источников исследователи связывают обеспечение качества непрерывно работающих систем со свойством высокой готовности или обеспечение надежности с учетом свойства инерции ресурса [9]. В [8] приводятся в том числе описания программных систем, в которых предполагается наличие подсистемы воспроизводства и совершенствования, то есть совершенствования этой самой подсистемы, что обусловлено наличием итеративного характера разработки программных комплексов. В ряде источников рассматриваются системы непрерывного функционирования, например, мониторингового типа, но не поясняется принцип их развития.

Таким образом, построение модели динамических требований к системе непрерывного функционирования с целью ее совершенствования – актуальная задача и один из подходов к ее решению представлен в данном исследовании

### Основная часть

**Систематизация требований к системе непрерывного функционирования.** Для построения систематизированного множества требований к развивающейся системе, их необходимо классифицировать по одному из параметров. Рассмотрим класс мониторинговых систем циклического типа (МСЦ). Для таких систем характерно то, что определенные действия, например, мониторинг данных по какому-либо объекту или явлению реализуется непрерывно, цикл за циклом. Для класса МСЦ важным показателем является время реализации требования по отношению ко времени цикла системы.

Примем  $t_w$  – время реализации реакции на  $w$ -ое требование;  $T_c$  – время цикла мониторинговой системы. Схема функционирования мониторинговой системы циклического типа изображена на рисунке 1

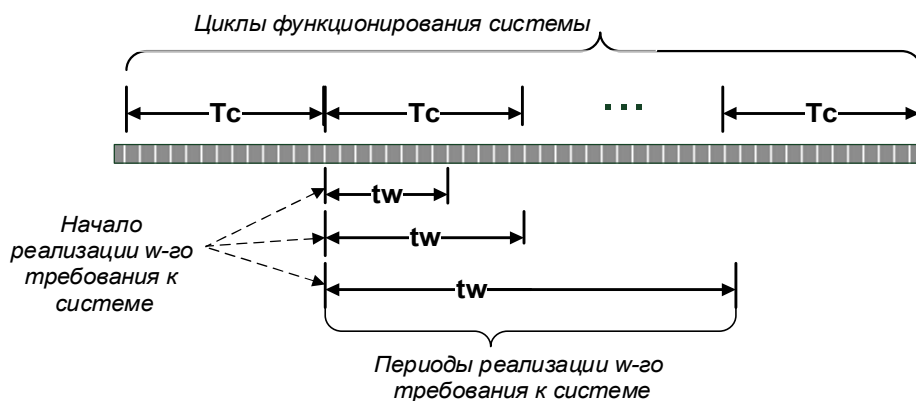


Рисунок 1 – Обобщенная схема циклического мониторинга данных

Представленная на рисунке 1 схема отражает три основных случая соотношения оценочных длительностей реализации требований к МСЦ: когда предполагаемая длительность меньше, равна или превышает длительность цикла системы. На основе этой категоризации требований рассмотрим предложенную модель совершенствования мониторинговых систем циклического типа с учетом поля динамических требований.

**Формальное представление модели динамических требований при проектировании развивающейся сложной системы.** Обозначим требования к развивающейся МСЦ в виде вектора  $\Theta = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_I]$ ,  $i = \overline{1, I}$  – индекс элемента вектора требований. Элементы вектора  $\Theta$  соответствуют значениям признаков требований.

Требованием к развивающейся непрерывно функционирующей системе называется совокупность признаков, отражающих качественные и количественные характеристики этого требования, заключающегося в изменении параметров самой системы. Например, требование к повышению скорости отклика МСЦ может иметь два признака: время реализации – максимально интенсивно, в ближайшем цикле функционирования; ожидаемая достижимость:  $v_0$  и  $v_t$  – текущая скорость отклика,  $v_t - v_0 \leq \delta$ ;  $\delta$  – допустимое отклонение.

Предполагается наличие нескольких альтернативных вариантов МСЦ, определяющихся различием проектных параметров, заданных множеством  $X$ :  $X_k = \{x_1, \dots, x_K\}$ . Тогда получим матрицу:  $\Theta_{i,j}$  требований, где  $\tau_{i,j}$  –  $i$ -ый признак требования для  $j$ -ого проектного параметра МСЦ:

$$\Theta_{i,j} = \begin{pmatrix} \tau_{1,1} & \dots & \tau_{1,K} \\ \dots & \tau_{i,j} & \dots \\ \tau_{I,1} & \dots & \tau_{I,K} \end{pmatrix}.$$

Реализация реакции на требование возможна, когда все составляющие вектора конструктивных параметров некоторого МСЦ, или интегральный показатель эффективности системы  $E$  удовлетворяют условиям:

$$\tau_{i,j} \simeq x_{i,j}; i = \overline{1, I}; j = \overline{1, K}, \quad (1)$$

$$t_w^{(\tau_{i,j})} \sim T_c; w = \overline{1, W}, \quad (2)$$

где в (1) обозначение « $\simeq$ » отражает соответствие требования  $\tau_{i,j}$  и альтернативного варианта МСЦ  $x_{i,j}$ , конструктивные параметры которого позволят реализовать это требование; в (2) обозначение « $\sim$ » отражает принцип соотношения соответствия  $t_w^{(\tau_{i,j})}$  предполагаемого времени реализации требования  $\tau_{i,j}$  времени цикла МСЦ (согласно рисунку 1).

Система МСЦ является открытой к развитию, если выполняются следующие условия:

а) любое требование, соответствующее заявке (задача) из заданного множества  $\Theta \sim \{Z\}$  может быть обслужено;

б) любое требование может быть априорно классифицировано и соотнесено со временем цикла системы  $t_w^{(\tau_{i,j})} \sim T_c$ .

Под заявкой (задачей) задачей понимается одно или несколько требований к системе, которые могут быть реализованы как одновременно, так и последовательно, приводя систему к ожидаемому состоянию или выполнению некоторого процесса. Например, задача получения набора данных мониторинга состояния объекта порождает требования к скорости получения этих данных, их объему, качеству и т.п.

Примем обозначения:  $Q_0$  – область обслуживания МСЦ, соответствующая совокупности конструктивных, программных, организационных компонент и т.п.;  $Q_k(\chi^g)$  – область обслуживания некоторой версии МСЦ;  $\chi^g$  – совокупность требований, которые могут быть обслужены  $k$ -й версией МСЦ из множества  $X_k = \{x_1, \dots, x_K\}$ , тогда любая открытая к развитию система должна удовлетворять условию

$$Q(K^g) = \bigcup_{\forall \chi} (Z_\chi(t)) \Big|_{t_0}^{t_w^{(\tau_{i,j})}=T_c} \rightarrow \bigcup_{\forall k} Q_k(\chi^g(t)) \Big|_{t_0}^{t_w^{(\tau_{i,j})}=T_c}, \quad (3)$$

где  $Z_\chi(t)$  – заявка (задача), порождающая требование к МСЦ, с учетом условий (1) и (2).

Соотношение (3) означает, что множество всех возможных заявок, породивших совокупность требований  $\chi^g$ , которые могут быть обслужены  $k$ -й версией МСЦ, отображается в объединение областей обслуживания некоторой версии МСЦ в рамках одного интервала цикла. Учитывая рисунок 1, получим совокупность соотношений относительно времени цикла МСЦ:

$$\begin{aligned} Q(K^g) &= \bigcup_{\forall \chi} (Z_\chi(t)) \Big|_{t_0}^{t_w^{(\tau_{i,j})} > T_c} \rightarrow \bigcup_{\forall k} Q_k(\chi^g(t)) \Big|_{t_0}^{t_w^{(\tau_{i,j})} > T_c}, \\ Q(K^g) &= \bigcup_{\forall \chi} (Z_\chi(t)) \Big|_{t_0}^{t_w^{(\tau_{i,j})} < T_c} \rightarrow \bigcup_{\forall k} Q_k(\chi^g(t)) \Big|_{t_0}^{t_w^{(\tau_{i,j})} < T_c}. \end{aligned} \quad (4)$$

Обозначим интегральную эффективность МСЦ как  $E(K)$ ; некоторой альтернативной версии МСЦ как  $E(K^g)$ . Оптимальной назовем такую открытую к развитию МСЦ, для которой выполняется условие

$$\begin{aligned} E(K) &= \max_g E(K^g) = \max_{g, Q(K^g)} E_{k, \chi_k}(\chi_k, \tau_{i,j}, x_{i,j}, t_w^{(\tau_{i,j})} | Z_k, T_c), \\ i &= \overline{1, I}; j = \overline{1, K}, w = \overline{1, W} \end{aligned} \quad (5)$$

Область определения функционала  $E$  ограничена множеством версий МСЦ  $K^g$  ( $g \in \{g\}$  – номер версии), которые могут быть синтезированы из множества возможных альтернативных версий.

Таким образом, задача нахождения эффективной МСЦ сводится к максимизации функционала (5) при выполнении условий (1)-(4), что в практической точки зрения означает формирование множества альтернативных версий МСЦ таких, что их проектные параметры

могут быть достаточными для реализации всех требований из множества задач, порождающих этих требования, причем в учете своевременного обслуживания всех требований.

На рисунке 2 показана укрупненная схема системы поддержки принятия решений по управлению эффективностью МСЦ на основе модели динамических требований (как развивающейся сложной системы).

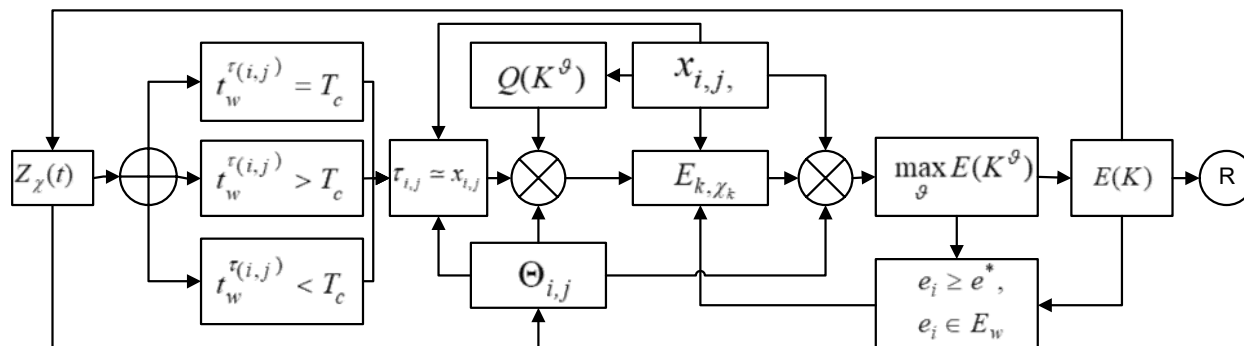


Рисунок 2 – Укрупненная схема системы поддержки принятия решений по управлению эффективностью мониторинговой системы циклического типа

На рисунке 2 окончательное решение по управлению эффективностью МСЦ на основе модели динамических требований (как развивающейся сложной системы) обозначено блоком R. На схеме показаны обратные связи, позволяющие осуществить подстройку процесса развития системы к условиям функционирования и длительности цикла  $T_c$ . Предложенная модель представлена в каркасном отображении и продолжает совершенствование в последующих работах авторов.

### Заключение

Предложена модель динамических требований при проектировании развивающейся сложной системы на примере МСЦ. На основе сделанных предположений и определений представлена спецификация основных требований и проведено специфицирование некоторого требования к МСЦ по карте классификации требований. Предполагается развитие предложенного метода в направлении получения количественных оценок ожидаемого времени реализации текущего требования к МСЦ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207-99 Информационная технология. Процессы жизненного цикла программных средств Режим доступа – <http://www.complexdoc.ru/lib/ГОСТ%20Р%20ИСО%20МЭК%2012207-99>.
2. Land, S.K.; Smith, D.B.; Walz, J.W. (2012). Practical Support for Lean Six Sigma Software Process Definition: Using IEEE Software Engineering Standards. John Wiley & Sons. pp. 341–3. ISBN 9780470289952.
3. 15288-2008 - ISO/IEC/IEEE Systems and Software Engineering — System Life Cycle Processes. 2008. doi:10.1109/IEEESTD.2008.4475828. ISBN 978-0-7381-5665-1.
4. Орлов, С.А. Технологии разработки программного обеспечения: учеб. / С.А. Орлов. – СПб.: Питер, 2002. – 464 с.
5. Доронина, Ю. В. Реинжиниринг информационных систем / Ю. В. Доронина; Севастопольский государственный университет. – Москва: ООО "Издательство "Спутник+", 2015. – 170 с. – ISBN 978-5-9973-3599-1.
6. Маклаков, С.В. Создание информационных систем с AllFusion Modeling Suite / С.В. Маклаков. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2005. – 432 с.
7. Дабагян А. В. Проектирование технических систем / А. В. Дабагян. – М.: Машиностроение, 1986. – 256 с.
8. Podvalny, S.L. Intelligent modeling systems: Design principles [Text] / S.L. Podvalny, T.M. Ledeneva // Automation and Remote Control. - 2013. - Т. 74. - №7. - С.1201-1210.
9. Smarsly K. Artificial Intelligence in Structural Health Monitoring International Workshop on Computing in Civil Engineering / K. Smarsly, K. Lehner, D. Hartmann. – 2017. – P. 111– 118.
10. Дедух А.Л., Горкунов Е.В. Непрерывное функционирование распределенных систем, Наука и техника Казахстана, N. 1, 2009, С. 64-68.

11. Modeling of monitoring processes of structurally heterogeneous technological objects / A. Skatkov, V. Shevchenko, D. Voronin, D. Moiseev // MATEC Web of Conferences (Sevastopol, 11–15 September, 2017). – 2017. – Vol. 129. – P. 03022.

12. Шокин, А. Г. Новые методы помехо-устойчивого кодирования информации / А. Г. Шокин, Н. Е. Сапожников, Д. В. Моисеев // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – Т. 6, № 9(60). – С. 26-30.

13. Оценка погрешностей выполнения вероятностных арифметических операций сложения и умножения / Н. Е. Сапожников, Д. В. Моисеев, П. С. Бейнер, Н. В. Бейнер // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 3, № 4(63). – С. 40-42.

14. Skatkov, A. V. Model for vulnerabilities detection in unmanned vehicle interfaces based on artificial immune systems / A. V. Skatkov, D. V. Moiseev, A. A. Bryukhovetskiy // JOP Conference Series: Metrological Support of Innovative Technologies, Krasnoyarsk, 04 марта 2020 года / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Vol. 1515. – Krasnoyarsk, Russia: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. – P. 22043. – DOI 10.1088/1742-6596/1515/2/022043.

15. Bryukhovetskiy, A. Research of the model for detecting UMV interfaces vulnerabilities based on information criterion / A. Bryukhovetskiy, V. Miryanova, D. Moiseev // III International Workshop on Modeling, Information Processing and Computing (MIP: Computing-2021), Krasnoyarsk, 28 мая 2021 года. Vol. 2899. – Krasnoyarsk, Russia: CEUR-WS, 2021. – P. 162-168. – DOI 10.47813/dnit-mip3/2021-2899-162-168. Moiseev, D. Method for detecting vulnerabilities of unmanned vehicle interfaces based on continuous values discretization / D. Moiseev, A. Bryukhovetskiy // III International Workshop on Modeling, Information Processing and Computing (MIP: Computing-2021), Krasnoyarsk, 28 мая 2021 года. Vol. 2899. – Krasnoyarsk, Russia: CEUR-WS, 2021. – P. 43-47. – DOI 10.47813/dnit-mip3/2021-2899-43-47. – EDN CJNSWO.

16. Moiseev, D. Models of the threat of virus idea dissemination in information-telecommunication networks / D. Moiseev, V. Miryanova // III International Workshop on Modeling, Information Processing and Computing (MIP: Computing-2021), Krasnoyarsk, 28 мая 2021 года. Vol. 2899. – Krasnoyarsk, Russia: CEUR-WS, 2021. – P. 175-180. – DOI 10.47813/dnit-mip3/2021-2899-175-180.

**Моисеев Дмитрий Владимирович**

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь

Доктор технических наук, доцент, директор института информационных технологий, заведующий кафедрой «Информационные технологии и компьютерные системы»

299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

Тел. +7862417741 (добавочный 1384),

DVMoiseev@sevsu.ru

**Доронина Юлия Валентиновна**

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь

Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Информационные технологии и компьютерные системы»

299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

Тел. +7862417741 (добавочный 1384),

YVDoronina@mail.sevsu.ru

---

D.V. MOISEEV, YU. V. DORONINA

## A MODEL OF DYNAMIC REQUIREMENTS IN THE DESIGN OF AN DEVELOPING COMPLEX SYSTEM

**Abstract.** *The problem of the development of continuous operation systems is considered; it is shown that the implementation of requirements for such a system must be carried out during the operation of the system. A model of classification of dynamic requirements for a developing system is proposed based on an a priori ratio of the estimate of the time of implementation of the requirement (period) with the cycle time of the complex system. The formulation of the problem of optimal design of the monitoring system under the condition of classification of dynamic requirements is proposed.*

**Keywords:** *dynamic requirements, developing system, reengineering, complex system.*

### BIBLIOGRAPHY

1. GOST R ISO/IEC 12207-99 Information technology. For most people, these are the software tools they use – <http://www.complexdoc.ru/lib/ГОСТ%20Р%20ИСО%7СМЭК%2012207-99>

2. Land, S.K.; Smith, D.B.; Waltz, J.W. (2012). Practical support for Lean Six Sigma Software Development: Using IEEE Software Development Standards. John Wiley & Sons. pp. 341-3. ISBN 9780470289952.

3. 15288-2008 - ISO/IEC/IEEE "Systems and Software Development" — Life cycle processes of systems. 2008. doi:10.1109/IEEESTD.2008.4475828. ISBN 978-0-7381-5665-1.



4. Orlov, S.A. Software development technologies: textbook / S.A. Orlov. – St. Petersburg: Peter, 2002. – 464 p.
5. Doronina, Yu. V. Reengineering of information systems / Yu. V. Doronina; Sevastopol State University. – Moscow: Sputnik+ Publishing House, 2015. – 170 p. – ISBN 978-5-9973-3599-1.
6. Maklakov, S.V. Creation of the AllFusion Modeling Suite software system / S.V. Maklakov. – M.: DIALOG-MEPHI, 2005. – 432 p.
7. Dabagyan A.V. Designing technical systems / A.V. Dabagyan. – M.: Mashinostroenie, 1986. – 256 p.
8. Podvalny, S.L. Intelligent modeling systems: principles of design [Text] / S.L. Podvalny, T.M. Ledeneva // Automation and remote control. - 2013. - vol. 74. - No.7. - pp.1201-1210.
9. Smarsley K. Artificial intelligence in monitoring the state of structures International Seminar on Computing in Civil Engineering / K. Smarsley, K. Lehner, D. Hartmann. – 2017. – pp. 111– 118.
10. Dedukh A.L., Gorkunov E.V. Continuous functioning of distributed systems, Science and Technology of Kazakhstan, issue 1, 2009, pp. 64-68
11. Modeling of monitoring processes of structurally heterogeneous technological objects / A. Skatkov, V. Shevchenko, D. Voronin, D. Moiseev // MATEC Web conferences (Sevastopol, September 11-15, 2017). - 2017. – Volume 129. – p. 03022.
12. Shokin, A. G. New methods of noise-resistant coding of information / A. G. Shokin, N. E. Sapozhnikov, D. V. Moiseev // East European Journal of Advanced Technologies. - 2012. – Vol. 6, No. 9(60). – pp. 26-30.
13. Estimation of errors in performing probabilistic arithmetic operations of addition and multiplication / N. E. Sapozhnikov, D. V. Moiseev, P. S. Beiner, N. V. Beiner // East European Journal of Advanced Technologies. - 2013. – Vol. 3, No. 4(63). – pp. 40-42.
14. Skatkov, A.V. Vulnerability detection model in the interfaces of unmanned vehicles based on artificial immune systems / A.V. Skatkov, D. V. Moiseev, A. A. Bryukhovetsky // JOP conference series "Metrological support of innovative technologies", Krasnoyarsk, March 04, 2020 / Krasnoyarsk Scientific and Technical Chamber of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Volume 1515. – Krasnoyarsk, Russia: Institute of Physics and Publishing house VGD, 2020. – p. 22043. – DOI 10.1088/1742-6596/1515/2/022043.
15. Bryukhovetsky, A. Investigation of the vulnerability detection model of UMV interfaces based on the information criterion / A. Bryukhovetsky, V. Miryanova, D. Moiseev // III International Seminar on Modeling, information Processing and Computing (MIP: Computing-2021), Krasnoyarsk, May 28, 2021. Volume 2899. – Krasnoyarsk, Russia: CEUR-WS, 2021. – pp. 162-168. – DOI 10.47813/dnit-mip3/2021-2899-162-168. Moiseev, D. A method for detecting vulnerabilities in unmanned vehicle interfaces based on continuous sampling of values / D. Moiseev, A. Bryukhovetsky // III International Seminar on Modeling, Information Processing and Computing (MIP: Computing-2021), Krasnoyarsk, May 28, 2021. Volume 2899. – Krasnoyarsk, Russia: CEUR-WS, 2021. – pp. 43-47. – DOI 10.47813/dnit-mip3/2021-2899-43-47. – EDN CHENSVO.
16. Moiseev, D. Models of the threat of the spread of viral ideas in information and telecommunications networks / D. Moiseev, V. Miryanova // III International Seminar on Modeling, information Processing and Computing (MIP: Computing-2021), Krasnoyarsk, May 28, 2021. Volume 2899. – Krasnoyarsk, Russia: CEUR-WS, 2021. – pp. 175-180. – DOI 10.47813/dnit-mip3/2021-2899-175-180.

#### **Moiseev Dmitry Vladimirovich**

FGAOU VO "Sevastopol State University", Sevastopol  
 Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,  
 Director of the Institute of Information Technology, Head  
 of the Department of Information Technology and  
 Computer Systems  
 299053, Sevastopol, st. University, 33  
 Tel. +7862417741 (ext. 1384),  
 DVMoiseev@sevsu.ru

#### **Doronina Yulia Valentinovna**

FGAOU VO "Sevastopol State University", Sevastopol  
 Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,  
 Professor of the Department of Information Technology  
 and Computer Systems  
 299053, Sevastopol, st. University, 33  
 Tel. +7862417741 (ext. 1384),

© Д.В. Моисеев, Ю.В. Доронина, 2024

А.В. НЕМЕНКО, М.М. НИКИТИН

## СТАБИЛИЗАЦИЯ ДВИЖЕНИЯ ПРИ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКЕ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ

**Аннотация.** *Финишная обработка тонкостенных труб направлена на получение равномерно однородной структуры поверхности. В процессе проведения работ под действием технологических усилий возникают побочные эффекты в виде колебаний, препятствующих получению изделий с заданными параметрами. Продольные колебания в циклическом проявлении вызывают усталостные повреждения структуры материала трубы и приводят к уменьшению её долговечности. В настоящей работе исследуется возможность стабилизации движения инструмента при финишной обработке тонкостенной трубы выбором закона изменения его движущей силы во времени.*

**Ключевые слова:** *финишная обработка, тонкостенная труба, упруго-массовая система, стабилизация движения.*

### Введение.

Изготовление тонкостенных труб является многоступенчатым процессом, в котором финишная обработка завершает создание изделия. При финишной обработке тонкостенных труб возникают колебания, влияющие на возможность получения поверхности с заданными параметрами [1].

Экстенсивным способом стабилизации процесса может быть снижение темпа обработки, а интенсивным – подбор управляющих воздействий и характеристик производственной системы, с целью снижения неблагоприятных эффектов.

Проводится много исследований детерминированному гашению колебаний, возникающих в процессе движения одно- двух- трех- и многомассовых систем [4], а также систем с распределенными массами [5].

Тем не менее, для технологического процесса финишной обработки тонкостенных труб в режиме возвратно-поступательного движения его стабилизация продолжает сохранять актуальность. Одним из принципиальных подходов к решению этой задачи является исследование каждого из проходов инструмента по обрабатываемой трубе на предмет отсутствия продольных колебаний. Этого результата можно добиться оптимизацией закона движения с подбором присоединенных технологических масс.

В приближенной математической модели режима, когда масса управляемого звена системы достаточно велика, то к выбору закона перемещения сводится и выбор управляющего воздействия.

При отходе от этого допущения и рассмотрении технологической системы с соизмеримыми массами звеньев, стабилизация движения возможна только при выполнении дополнительных условий, которые исследуются в настоящей работе.

### Цель работы.

Получить условия стабилизации движения дискового инструмента, совершающего обработку тонкостенной трубы.

### Материал исследования

Рассмотрим обработку внешней поверхности трубы инструментом, осуществляющим вращательное и возвратно-поступательное движение, которое требуется скоординировать с тем, чтобы погасить колебания системы после завершения каждого рабочего хода.

Считаем, что изделие равномерно вращается вокруг оси от внешнего привода и достаточно массивно для того, чтобы эта равномерность не нарушалась при обработке.

Рассмотрим полное движение за половину рабочего хода, в течение которого центр масс инструмента линейно перемещается между двумя заданными точками. При этом должно обеспечиваться состояние покоя диска в начале и конце движения.

Координату центра масс инструмента в проекции на ось трубы обозначим через  $x$ , угол его поворота – через  $\varphi$ .

Уравнение квазистатического равновесия инструмента

$$\sum_i F_i = 0, \quad (1)$$

где  $\sum_i F_i$  - сумма всех сил, действующих на инструмент в направлении его движения.

$$\sum_i F_i = F_u + \sum F_D - \sum F_C, \quad (2)$$

где  $F_u$  – сила инерции при поступательном движении инструмента,  $H$ ;  $\sum F_D$  – сумма всех движущих сил, действующих в выделенном направлении движения,  $H$ ;  $\sum F_C$  – сумма всех сил сопротивления, которые действуют в направлении, противоположном выделенному.

Раскрывая силы, входящие в формулу (2), запишем

$$F_u = -m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2}, \quad (3)$$

где  $m$  – масса инструмента, кг,

$$\sum F_D = F_{yв} + \frac{M_D}{r}, \quad (4)$$

где  $F_{yв}$  – сила управляющего воздействия, которую требуется найти;  $H$ ;  $M_D$  – суммарный движущий момент, действующий на инструмент;  $H \cdot m$ ,  $r$  – средний радиус обработки,  $m$ .

$$\sum F_C = F_{yпр} + \frac{M_C}{r}, \quad (5)$$

где  $F_{yпр}$  – сила упругого сопротивления трубы,  $H$ ;  $M_C$  – суммарный момент сопротивления, действующий на инструмент,  $H \cdot m$ .

Будем искать закон изменения во времени силы управляющего воздействия  $F_{yв}$  как функцию, переводящую инструмент из точки с координатой  $x_a$  в точку с координатой  $x_b$  за время  $t_1$  и обеспечивающую остановку системы.

Обозначим радиус инструмента через  $r_u$ , радиус трубы через  $r_m$ , расстояние между скрещивающимися под прямым углом осями трубы и инструмента обозначим через  $h$ .

Будем искать эффективный радиус обработки трубы вращающимся инструментом.

Заметим, что угол охвата линии обработки двумя касательными проведенными к ней из центра инструмента, составит

$$\alpha_{\max} = 2 \arcsin \frac{h}{r_u}. \quad (6)$$

Принимая, что вектор локальной скорости в зоне обработки направлен нормально к радиусу диска, оценим средний радиус как

$$r = \frac{1}{\alpha_{\max}} \int_{-\alpha_{\max}/2}^{\alpha_{\max}/2} \frac{h}{\cos \alpha} d\alpha, \quad (7)$$

где  $\alpha$  – переменный угол интегрирования, который уходит после взятия интеграла.

Постоянное расстояние между осями трубы и инструмента мы можем вынести за знак интегрирования, в результате, используя табличную формулу, получим

$$r = \frac{h}{\alpha_{\max}} \ln \frac{1 + \sin \alpha}{\cos \alpha} \Big|_{-\alpha_{\max}/2}^{\alpha_{\max}/2}. \quad (8)$$

Учитывая свойства логарифмов и тригонометрических функций, преобразуем формулу (8) к виду

$$r = \frac{h}{2 \arcsin \frac{h}{r_u}} \ln \frac{r_u + h}{r_u - h}. \quad (9)$$

Это будет радиус условного точечного контакта, которым мы заменим фактически имеющий место линейный контакт.

Среднюю скорость инструмента на рассмотренной линии контакта

$$v_u = \omega_u \cdot r \quad (10)$$

При рассмотрении скоростей отдельных точек диска, вращающегося как твёрдое тело, получим, что вектор средней скорости точек обрабатываемой линии коллинеарен ей, а, следовательно, и оси вращения трубы.

Принимаем, что труба вращается вокруг своей оси равномерно с угловой скоростью  $\omega_m$  и имеет внешний радиус  $r_m$ . Тогда скорость точки трубы в зоне обработки относительно неподвижной системы координат будет равна

$$v_m = \omega_m \cdot r_m \quad (11)$$

В результате векторного сложения скоростей трубы и инструмента получим, что модуль результирующего вектора скорости в условной точке обработки определится соотношением

$$v_{обп} = \sqrt{\left(\omega_u \cdot r + \frac{dx_u}{dt}\right)^2 + v_m^2} \quad (12)$$

при значении угла его наклона к геометрической оси трубы

$$\beta = \pm \arctg \frac{1}{v_m} \left( \omega_u \cdot r + \frac{dx_u}{dt} \right), \quad (13)$$

где знак зависит от направления вращения трубы относительно направления вращения инструмента.

В результате при поступательном движении инструмента условная точка обработки будет перемещаться вдоль трубы по винтовой линии с углом подъема  $(\pi/2 - \beta)$ .

Формулы (9) ... (13) имеют место при постоянных условиях контакта инструмента и трубы по всей линии прилегания.

Изменение условий прилегания может быть описано введением приращения среднего эффективного радиуса, которое мы обозначим через  $\Delta r$ . Эта величина может быть получена, в том числе, путем наблюдений за процессом обработки и меняется в каждый момент времени.

Считаем, что закон поступательного перемещения оси диска вдоль трубы в течение половины рабочего хода задан механически или программно так, что выполняется пара начальных условий

$$x|_{t=0} = x_a; \quad \frac{dx}{dt}\bigg|_{t=0} = 0, \quad x|_{t=t_1} = x_b; \quad \frac{dx}{dt}\bigg|_{t=t_1} = 0. \quad (14)$$

Оценим силу упругости, возникающую от изменения эквивалентного радиуса инструмента. Считаем, что диск, координата которого есть  $x$ , причем  $(x_a < x < x_b)$ , находится в контакте с трубой, что вызывает её растяжение на величину  $\Delta r$  на участке трубы длиной  $(x - x_a)$  и сжатие на величину  $\Delta r$  на участке трубы длиной  $(x_b - x)$ .

Результирующую силу упругости, создающую волну, будем искать как разность упругих сил на этих двух участках.

Используя в первом приближении закон Гука, получим

$$F_{ynp} = S \cdot E \cdot \Delta r \cdot \left( \frac{1}{x_b - x} - \frac{1}{x - x_a} \right), \quad (15)$$

где  $S$  – площадь сечения трубы,  $m^2$ ;  $E$  – модуль упругости её материала,  $Па$ .

Для круглого тонкостенного изделия формула (15) может быть записана в виде

$$F_{ynp} = 2\pi \cdot r_m \cdot h_m \cdot E \cdot \Delta r \cdot \left( \frac{1}{x_b - x} - \frac{1}{x - x_a} \right), \quad (16)$$

где  $r_m$  – радиус трубы,  $m$ ;  $h_m$  – толщина стенки трубы,  $m$ .

Тогда для стабилизации движения инструмента при рассмотренном движении оказывается достаточным выполнение условия равенства силы управляющего воздействия следующей величине

$$F_{y\theta} = m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} - \frac{M_D - M_C}{r + \Delta r} + 2\pi \cdot r_m \cdot h_m \cdot E \cdot \Delta r \cdot \left( \frac{1}{x_b - x} - \frac{1}{x - x_a} \right). \quad (17)$$

Формулу (17) можно представить в виде суммы предварительно вычисляемой (не зависящей от изменения эквивалентного радиуса инструмента) и контролируемой (зависящей от этого изменения) частей

$$F_{y\theta} = F_0 + F_1, \quad (18)$$

где

$$F_0 = m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} - \frac{M_D - M_C}{r}, \quad (19)$$

$$F_1 = \frac{M_D - M_C}{r^2} \cdot \Delta r + 2\pi \cdot r_m \cdot h_m \cdot E \cdot \left( \frac{1}{x_b - x} - \frac{1}{x - x_a} \right) \cdot \Delta r. \quad (20)$$

Взяв отношение (20) к  $\Delta r$ , получим мгновенную передаточную функцию системы автоматического управления линейной подачей, применяемую для стабилизации технологического процесса в каждый момент времени.

$$\gamma = \frac{M_D - M_C}{r^2} + 2\pi \cdot r_m \cdot h_m \cdot E \cdot \left( \frac{1}{x_b - x} - \frac{1}{x - x_a} \right). \quad (21)$$

### Выводы.

В настоящей работе были получены условия стабилизации движения инструмента, используемого при обработке тонкостенной трубы, выбором закона изменения движущей силы во времени.

В качестве средства управления движением системы представляется поддержание соответствующей величины разности суммарных движущих сил и сил технологического сопротивления с помощью датчика, оценивающего эффективный радиус обработки.

Для придания определенности начальным условиям представляется применимым метод неконтактного определения позиции движущегося объекта [6]. Кроме того, при долгосрочных оценках [7] эксплуатационной и технологической выносливости данного способа управления производственным процессом представляются актуальными оценки тепловой напряженности в разных точках обрабатываемого изделия [8].

Предлагаемый подход представляется перспективным средством повышения производительности при финишной обработке тонкостенных труб.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клубович В.В. Технологии обработки тонкостенных труб постоянного и переменного профиля/ В.В. Клубович, В.А. Томило, В.В. Левкович// Металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов / редкол.: И. А. Иванов (гл. ред) [и др.]. – Минск: БНТУ, 2019. – вып. 40. – с. 203 –212.
2. Томило В.А. Ротационное выдавливание при обработке тонкостенных труб/В.А. Томило, В.В. Левкович//Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка, 2022 – с. 725 – 730.
3. Лаврентьев А.М. Исследование процесса ротационного обкатывания длинных тонкостенных труб/А.М. Лаврентьев// Современные наукоемкие технологии, 2020.. – вып. 7 – с. 73 – 77.
4. Васенин С.А. Оптимальное подавление колебаний в задаче раскручивания двухмассовой системы/ С.А. Васенин, С.А. Решмин// Теория и системы управления, 2023. – вып. 6 – с. 67 – 80.
5. Афанасьев В.С. Оптимальное подавление поперечных колебаний вращающихся упругих стержней/ В.С. Афанасьев, Н.В. Баничук// Проблемы прочности и пластичности, 2021. – вып. 83(1), с. 49 -60.
6. Неменко А.В. Линейная реконструкция положения контролируемого объекта/А.В. Неменко, М.М. Никитин//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2020, №4-2(342), С.136 – 140.
7. Неменко А.В. Дальний прогноз эксплуатационной надежности производственной системы/А.В. Неменко, М.М. Никитин//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2022, №4(354),с.58 - 64.
8. Неменко А.В. Прогнозная оценка параметров теплового поля судовой энергетической установки/ А.В. Неменко, М.М. Никитин// Вестник СевНТУ. Сер. Механика, энергетика, экология: сб. науч. тр. – Севастополь, 2014. – вып. 148 – с. 207 – 210.

**Неменко Александра Васильевна**

ФГАОУ «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Цифровое проектирование»  
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33  
Тел. +79788330519  
E-mail: valesan@list.ru

**Никитин Михаил Михайлович**

ФГАОУ «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь  
Старший преподаватель кафедры «Высшая математика»  
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33  
Тел. +79788150316  
E-mail: MMNikitin@sevsu.ru

A.V. NEMENKO, M.M. NIKITIN

## MOVEMENT STABILIZATION DURING THIN-WALLED TUBES FINISHING

**Abstract.** *Thin-walled tubes, while subject to increased precision requirements, often need additional machining. During such machining, the problem of vibrations arises due to technological forces. This problem for longitudinal vibrations can be fundamentally solved by choosing the law of motion of the “pipe-equipment” system. As shown in present paper, when specifying both the distance and time of movement, there is a correct solution for arbitrary system masses and pipe stiffness, despite the fact that the number of initial conditions in the resulting Cauchy problem exceeds the total order of the highest derivatives of the variables of the system of differential equations. Formulas are given for the law of change of control action over time, ensuring the absence of system oscillations after its removal.*

**Keywords:** *mass finishing, thin-walled pipe, elastic-mass system, movement stabilization.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Klubovich V.V. Tehnologii obrabotki tonkostennyh trub postojannogo i peremennogo profilja/ V.V. Klubovich, V.A. Tomilo, V.V. Levkovich// Metallurgija: respublikanskij mezhvedomstvennyj sbornik nauchnyh trudov / redkol.: I. A. Ivanov (gl. red) [i dr.]. – Minsk: BNTU, 2019. – vyp. 40. – s. 203 –212.
2. Tomilo V.A. Rotacionnoe vydavlivanie pri obrabotke tonkostennyh trub/V.A. Tomilo, V.V. Levkovich//Novye materialy i tehnologii: poroshkovaja metallurgija, kompozicionnye materialy, zashhitnye pokrytija, svarka, 2022 – s. 725 – 730.
3. Lavrentev A.M. Issledovanie processa rotacionnogo obkatyvanija dlinnyh tonkostennyh trub/A.M. Lavrentev// Sovremennye naukoemkie tehnologii, 2020.. – vyp. 7 – s. 73 – 77.
4. Vasenin S.A. Optimalnoe podavlenie kolebanij v zadache raskruchivaniya dvuhmassovoj sistemy/ S.A. Vasenin, S.A. Reshmin// Teorija i sistemy upravlenija, 2023. – vyp. 6 – s. 67 – 80.
5. Afanasev V.S. Optimalnoe podavlenie poperechnykh kolebanij vrashhajushhihsja uprugih sterzhnej/ V.S. Afanasev, N.V. Banichuk// Problemy prochnosti i plastichnosti, 2021. – vyp. 83(1), s. 49 -60.
6. Nemenko A.V. Linejnaja rekonstrukcija polozhenija kontroliruемого ob#ekta/A.V. Nemenko, M.M. Nikitin//Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii, 2020, №4-2(342), S.136 – 140.
7. Nemenko A.V. Dalnij prognoz jekspluatacionnoj nadezhnosti proizvodstvennoj sistemy/A.V. Nemenko, M.M. Nikitin//Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii, 2022, №4(354),s.58 - 64.
8. Nemenko A.V. Prognoznaja ocenka parametrov teplovogo polja sudovoj jenergeticheskoj ustanovki/ A.V. Nemenko, M.M. Nikitin// Vestnik SevNTU. Ser. Mehanika, jenergetika, jekologija: sb. nauch. tr. – Sevastopol, 2014. – vyp. 148 – s. 207 – 210.

**Nemenko Aleksandra Vasilyevna**

Federal State Autonomous Educational Foundation  
«Sevastopol State University», Sevastopol  
Ph.D., docent of chair «Digital design »  
299053, Sevastopol, ul. Universitetskaya, 33  
Ph.:+79788330519  
E-mail:valesan@list.ru

**Nikitin Mikhail Mikhailovich**

Federal State Autonomous Educational Foundation  
«Sevastopol State University», Sevastopol  
Senior lecturer of chair «Higher Mathematics»  
299053, Sevastopol, ul. Universitetskaya, 33  
Ph.:+79788150316  
E-mail: MMNikitin@sevsu.ru

© А.В. Неменко, М.М. Никитин, 2024

З.А. ГОДЖАЕВ, В.В. ШЕХОВЦОВ, М.В. ЛЯШЕНКО,  
П.В. ПОТАПОВ, А.И. ИСКАЛИЕВ, А.А. ПУШКАРЕВ

## ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ УПРУГИХ МУФТ ДЛЯ СИЛОВЫХ ПЕРЕДАЧ ТЯГОВЫХ И ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

**Аннотация.** В статье рассмотрены технические решения упругих муфт для силовых передач тяговых и транспортных машин. В эксплуатации на детали механических силовых передач колесных и гусеничных машин действует целый комплекс динамических нагрузок с широким диапазоном амплитуд и спектром частот. Для снижения динамической нагруженности деталей в состав передач включаются упругие и демпфирующие элементы. Среди них наиболее распространены упругие муфты, при помощи которых срезаются пики динамических нагрузок, снижаются динамические воздействия от изменения пространственного расположения деталей при действии переменных нагрузок (несоосности валов, деформаций и смещений контактирующих пар), осуществляется отстройка от резонансов. Авторами рассмотрены технические решения упругих муфт, предложенные российскими авторами, с анализом конструкций, который позволяет проследить их эволюцию. Рассмотрены технические решения муфт с резиновыми упругими элементами, в том числе с дисками и звездообразными элементами из резины, с резиновыми втулками, втулочно-пальцевые муфты и муфты с упругими элементами оболочечного типа. Рассмотрены также технические решения муфт с металлическими упругими элементами, в том числе с различными пружинами и пакетами упругих профилированных дисков. Приведено описание созданного и запатентованного авторами нового технического решения упругой муфты для силовой передачи тягово-транспортного средства с комплексной линейно-нелинейной упругой характеристикой. Ее конструкция обеспечивает снижение динамической нагруженности силовой передачи как на установившихся, так и на неустановившихся режимах эксплуатации тягового средства.

**Ключевые слова:** упругая муфта, тяговые и транспортные средства, резиновые упругие элементы, металлические упругие элементы, динамическая нагруженность, снижение нагруженности.

### Введение

В эксплуатации на детали механических силовых передач колесных машин действует целый комплекс динамических нагрузок с широким диапазоном амплитуд и спектром частот [1-12]. Наиболее опасные с точки зрения прочности динамические воздействия на ее детали передаются со стороны ходовой системы и подвески. Эти воздействия имеют высокую амплитуду, которая кратковременно может превышать номинальную расчетную нагрузку, то есть формировать перегрузку деталей. Спектр частот этих нагрузок широкий, от низкочастотных до высокочастотных, но наибольшей колебательной энергией обладают низкочастотные высокоамплитудные. Со стороны двигателя на силовую передачу действуют высокочастотные нагрузки от гармонических составляющих крутящего момента, а также нагрузки от колебаний двигателя на подвеске при изменениях режима его работы. Периодические управляющие воздействия оператора на узлы силовой передачи с целью изменения направления или скорости движения машины (поворот, разгон, торможение) также приводят к изменениям нагруженности деталей. В результате всех этих динамических воздействий в силовой передаче формируется сложная картина крутильных и изгибных колебаний. Длительное воздействие этих колебаний приводит к накоплению в деталях усталостных повреждений, к отказам и поломкам [13-20].

Для снижения динамической нагруженности деталей в состав передач включаются упругие и демпфирующие элементы [21-22]. Среди них наиболее распространены упругие муфты, при помощи которых срезаются пики динамических нагрузок, снижаются динамические воздействия от изменения пространственного расположения деталей при действии переменных нагрузок (несоосности валов, деформаций и смещений контактирующих пар), осуществляется отстройка от резонансов. Конструкции упругих муфт зависят от того, в какую силовую передачу какой машины они устанавливаются и для какой цели. В их состав могут входить резиновые и металлические упругие элементы, а также комбинированные, в том числе пневматические, гидравлические, фрикционные либо электромагнитные. Параметры каждого из этих элементов должны определяться на этапе проектирования.

Ниже рассмотрены технические решения упругих муфт, предложенные российскими авторами. Анализ позволяет проследить (ограниченно) эволюцию их конструкций. Как правило, конструкции муфт с течением времени усложняются, но также увеличиваются их возможности по защите силового валопровода от нагрузок в результате действия более широкого разнообразия динамических воздействий в машинах, оснащаемых все более



мощными двигателями и обладающих все большими функциональными возможностями. Муфты предназначены для использования преимущественно в конструкциях силовых передач тяговых и транспортных машин.

### 1. Технические решения муфт с резиновыми упругими элементами

Использование резины в качестве упругого элемента в муфтах продиктовано ее собственными свойствами. Современные технологии позволяют получать резины с самыми разными упругими, прочностными, реологическими и иными свойствами. Резины, используемые в конструкциях упругих муфт, отличаются высокой эластичностью (способностью подвергаться обратимым деформациям до 1000 % и более), способностью поглощать энергию высокочастотных нагрузок; способностью к большим обратимым деформациям при статических и динамических нагружениях; стойкостью к действию агрессивных сред; малой водо- и газопроницаемостью; хорошими диэлектрическими свойствами.

Одним из самых простых вариантов выполнения упругой муфты являлся в свое время вариант, в котором между ведущей и ведомой полумуфтами просто устанавливался диск из резины [23], который обеспечивал упругие и компенсационные свойства муфты. Схема конструктивного решения такой муфты приведена на рисунке 1.

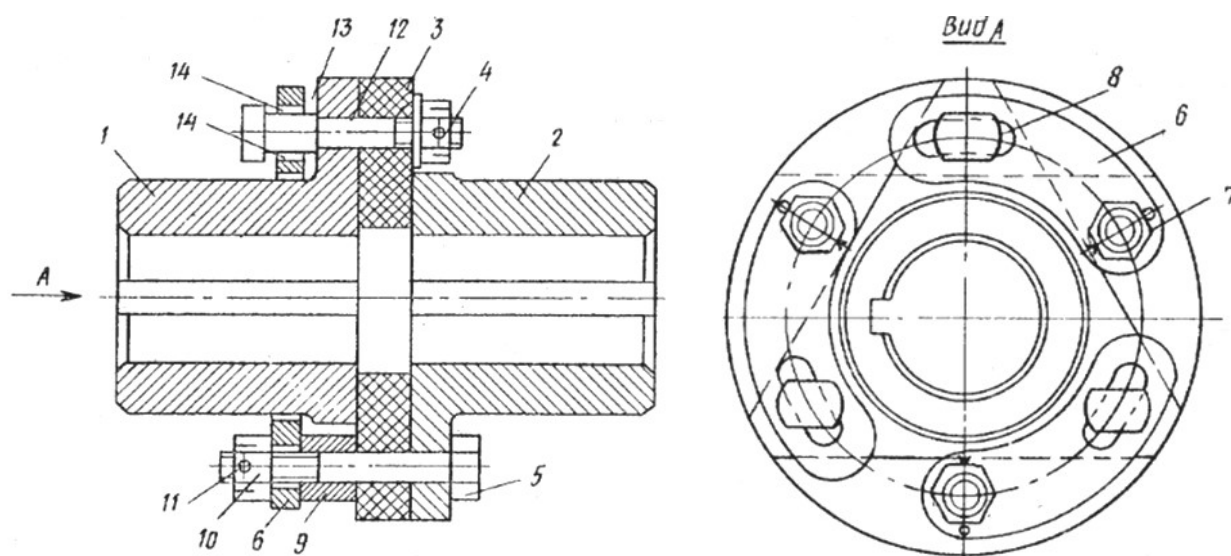


Рисунок 1 - Упругая муфта с диском из резины

Муфта содержит полумуфты 1 и 2, между фланцами которых установлен упругий диск 3, соединенный пальцами 4 и 5 с полумуфтами. Пальцы со стороны полумуфты 1, соединены попарно планками 6, имеющими круглое отверстие 7 и продольный паз 8.

Между планками 6 и диском 3 в районе отверстий 7 установлены прокладки 9. Концы планок с отверстием 7 зафиксированы на пальцах 5 от осевых смещений корончатой гайкой 10 со шплинтом 11 и прокладкой 9. Роль головки пальца выполняет торец 12 ступени большего диаметра пальца. Концы планок с продольным пазом 8 не зафиксированы на пальце 4 в осевом и радиальном направлениях и имеют возможность перемещаться в пределах зазоров 13 и 14.

При вращении полумуфты 1 крутящий момент передается через упругий диск 3 полумуфте 2. Планки 6 в передаче крутящего момента не участвуют, поскольку пальцы 4 установлены посередине продольного паза 8. В случае разрушения упругого диска 3 полумуфта 1 соединяется с полумуфтой 2 планками 6. При перекосах и смещениях валов компенсационные свойства муфты сохраняются, так как один конец планки 6 с продольным пазом 8 имеет возможность перемещаться в осевом и радиальном направлениях в пределах зазоров 13 и 14.

Одной из распространенных форм устанавливаемого между полумуфтами упругого элемента является звездообразная форма, как, например, в техническом решении [24] (рисунок 2).

Муфта содержит полумуфту 1 с кулачками 2 и полумуфту 3 с кулачками 4. Упругий элемент 5 из гидропласта заполняет пространство между кулачками 2 и 4, ограниченное кольцом 6 и фланцами полумуфт, в осевых отверстиях которых установлены заглушки 7.

Гидропласт заливается через отверстие в кольце 6, заглушенное пробкой 8. Между кольцом 6 и фланцами 1 и 2 установлены уплотнительные кольца 9.

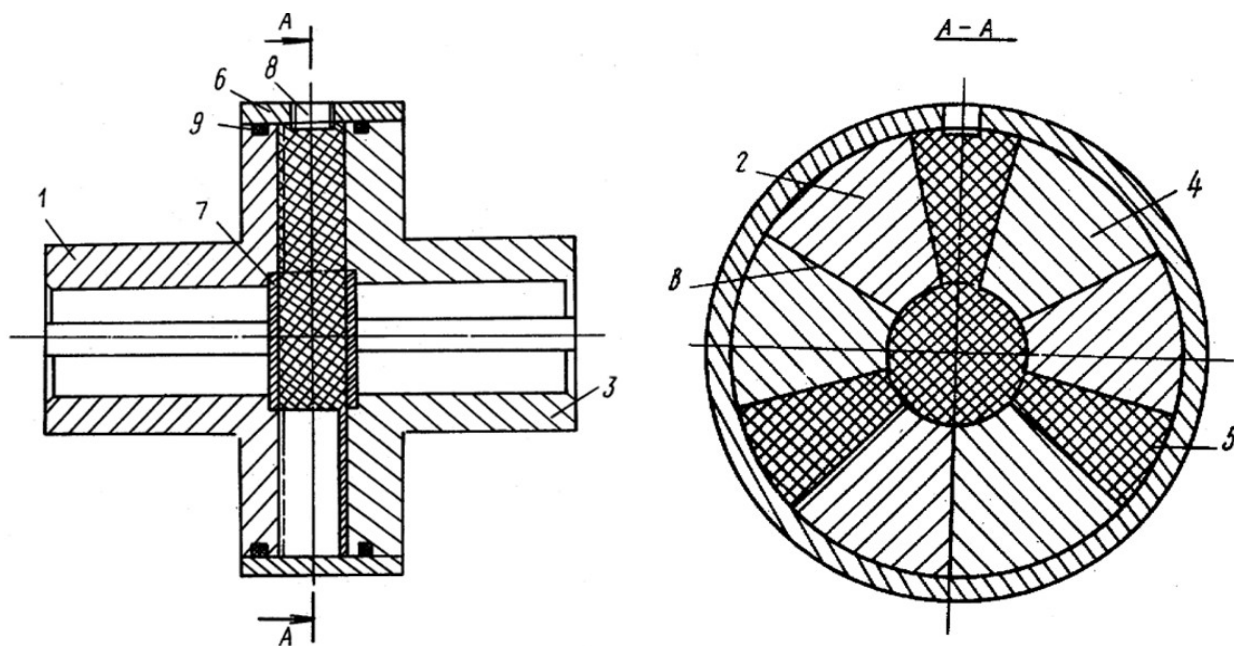


Рисунок 2 - Муфта со звездообразным упругим элементом

При вращении ведущей полумуфты 1 нагрузку от крутящего момента воспринимает упругий элемент из гидропласта. Под действием нагрузки гидропласт выдавливается из зоны между кулачками 2 и 4 до полного их соприкосновения в расширяющийся зазор *B*, и вращение передается на ведомую полумуфту 3 непосредственно кулачками 2 и 4.

При реверсивном вращении нагрузка передается через гидропласт в зазоре *B*, который выдавливается в первоначальное положение до соприкосновения кулачков.

Упругий элемент участвует в работе только в момент включения и только исключает удары кулачков полумуфт, а передача момента осуществляется кулачками.

В ряде технических решений используются резиновые втулки, как, например, в компенсирующей муфте [25], схема которой представлена на рисунок 3. Муфта состоит из двух соосно расположенных полумуфт 1 и 2 с пальцами 3. Смежные пальцы разных полумуфт шарнирно соединены поводками 4. Шарнирные соединения 5 пальцев 3 с поводками 4 осуществляется через резиновые втулки.

При передаче момента муфтой один поводок работает на сжатие, другой – на растяжение, т.е. муфта является реверсивной.

Угловое относительное перемещение валов вызывает соосное скручивание шарниров, что обуславливает малое сопротивление перемещению, а разный знак деформаций поводков при этом приводит к внутренней компенсации углов поворота, что в свою очередь не вызывает дополнительного относительного поворота валов вокруг своих осей. Этим обеспечивается постоянство угловой скорости ведущего и ведомого валов.

При относительном взаимном осевом смещении валов основным видом деформации шарниров является соосное скручивание. Следовательно, осевая жесткость муфты будет невысокой. Условие постоянства угловой скорости здесь также выполняется.

Наиболее распространенными среди упругих муфт являются втулочно-пальцевые муфты. Они отличаются тем, что с одной из полумуфт пальцы соединяются жестко, а с другой – через резиновые элементы. Такова конструкция муфты [26], схема которой дана на рисунок 4.

Муфта содержит две фланцевые полумуфты 1 и 2, взаимодействующие между собой через упругие втулки 3 с обхватывающими их пальцами 4, установленные на соосные пальцы 5 со сферическими концами, закрепленные на полумуфтах.

Пальцы 4 выполнены из упругого материала и снабжены встречными, смещенными один относительно другого продольными пазами 6, заканчивающимися радиальными отверстиями 7. При этом отношение длины паза к длине кольца составляет 0,75-0,80, а отношение диаметра отверстия к ширине паза 1,2-1,4.

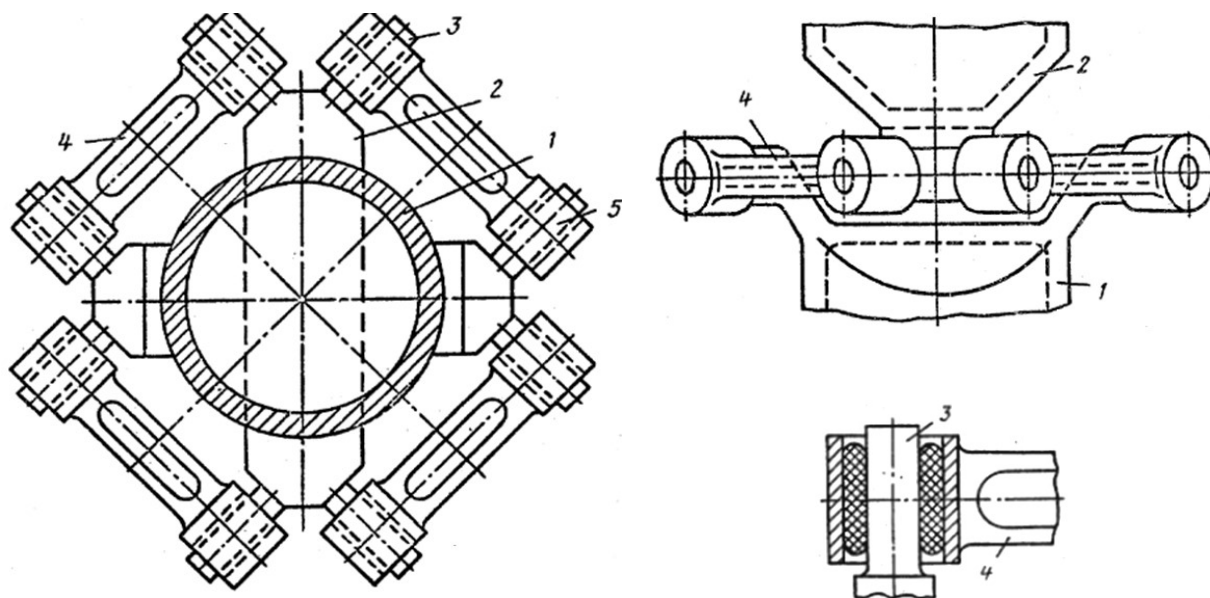


Рисунок 3 - Муфта с резиновыми втулками

При вращении ведущей полумуфты 1 крутящий момент другой полумуфте 2 передается через упругий элемент 3.

Более совершенным является техническое решение муфты [27], представленной на Рисунок 5. Она содержит две взаимозаменяемые полумуфты 1 и 2, в которых равномерно по окружности закреплены пальцы 3 и 4. На пальцах 3 полумуфты 1 установлены упругие втулки 5, а пальцы 4 полумуфты 2 снабжены сухарями 6, боковые поверхности которых выполнены с впадинами, контактирующими с упругими втулками 5.

Отверстия в сухарях 6 имеют бочкообразную поверхность с радиусом  $R$ , что увеличивает диапазон допустимых муфтой смещений и перекосов соединяемых валов.

При вращении полумуфта 1 пальцами 3 через втулки 5 и сухари 6 оказывает давление на пальцы 4 полумуфты 2, вызывая ее вращение. При этом происходит деформация упругих втулок 5, чем обеспечивается эластичность передачи нагрузки между полумуфтами.

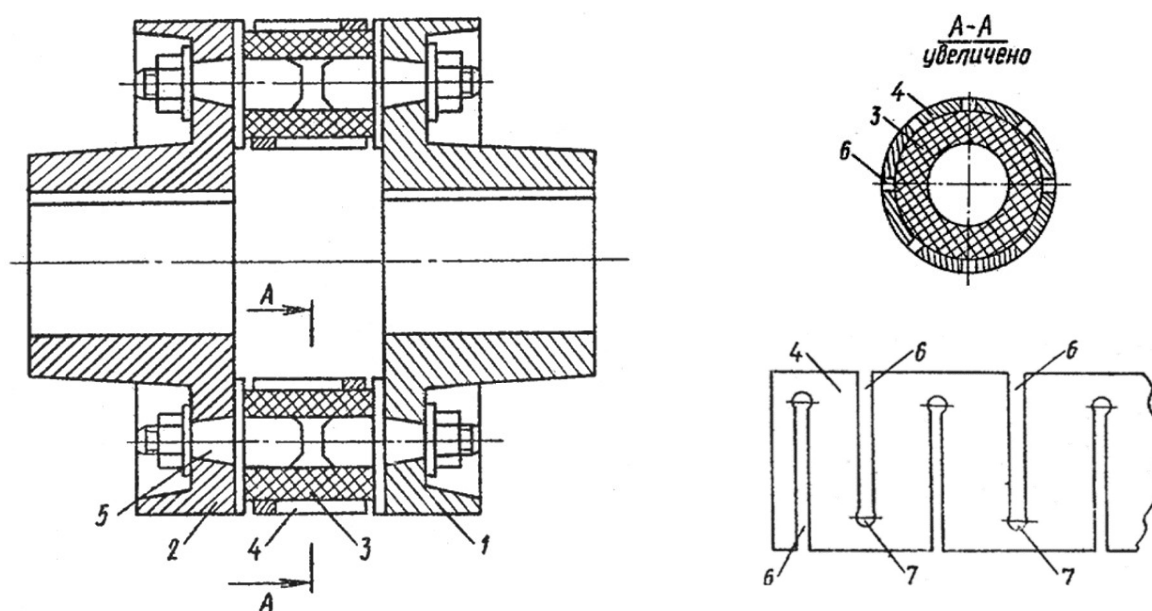


Рисунок 4 - Втулочно-пальцевая муфта

Распространены также конструкции муфт с упругими элементами оболочечного типа [28], пример технического решения которой представлен на Рисунок 6.

Муфта содержит ведущую и ведомую полумуфты, к которым нажимными кольцами 3 и 4 с помощью винтов 5 прикреплена упругая торообразная оболочка 6.

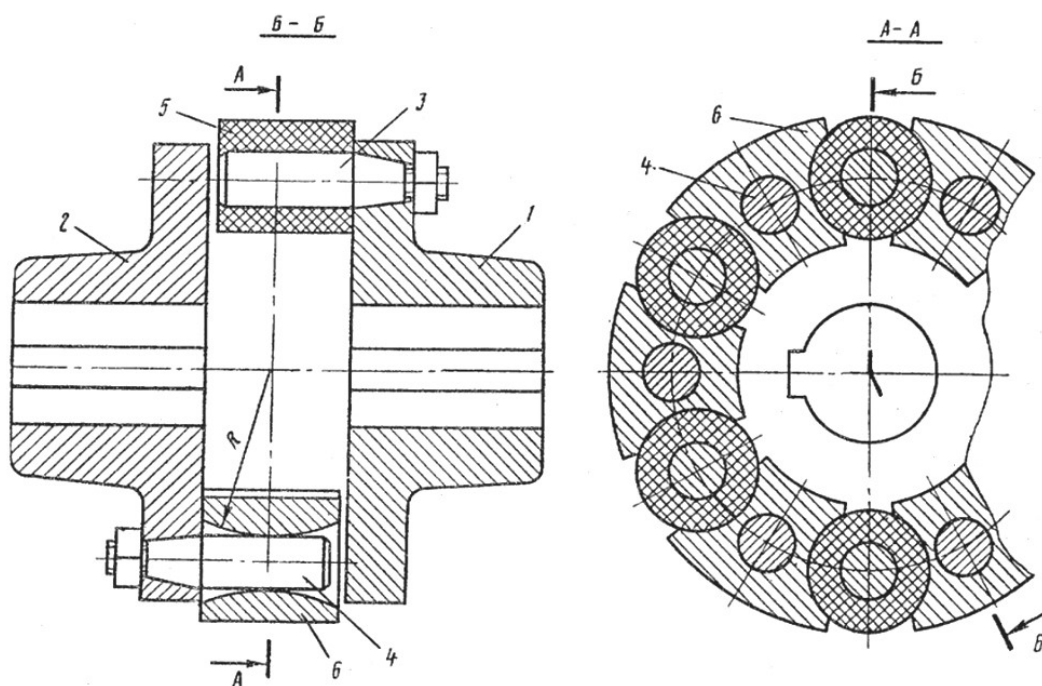


Рисунок 5 - Муфта с профильными сухарями

Напряжения в месте заделки определяются по формуле

$$q_3 = \frac{M}{2\pi d^2 h_3}, \quad (1)$$

где  $q_3$  – касательные напряжения в заделке;  
 $M$  – крутящий момент;  
 $d$  – диаметр центров изгиба оболочки;  
 $h_3$  – толщина торообразного элемента в месте заделки, выбираемая из условий допустимых напряжений.

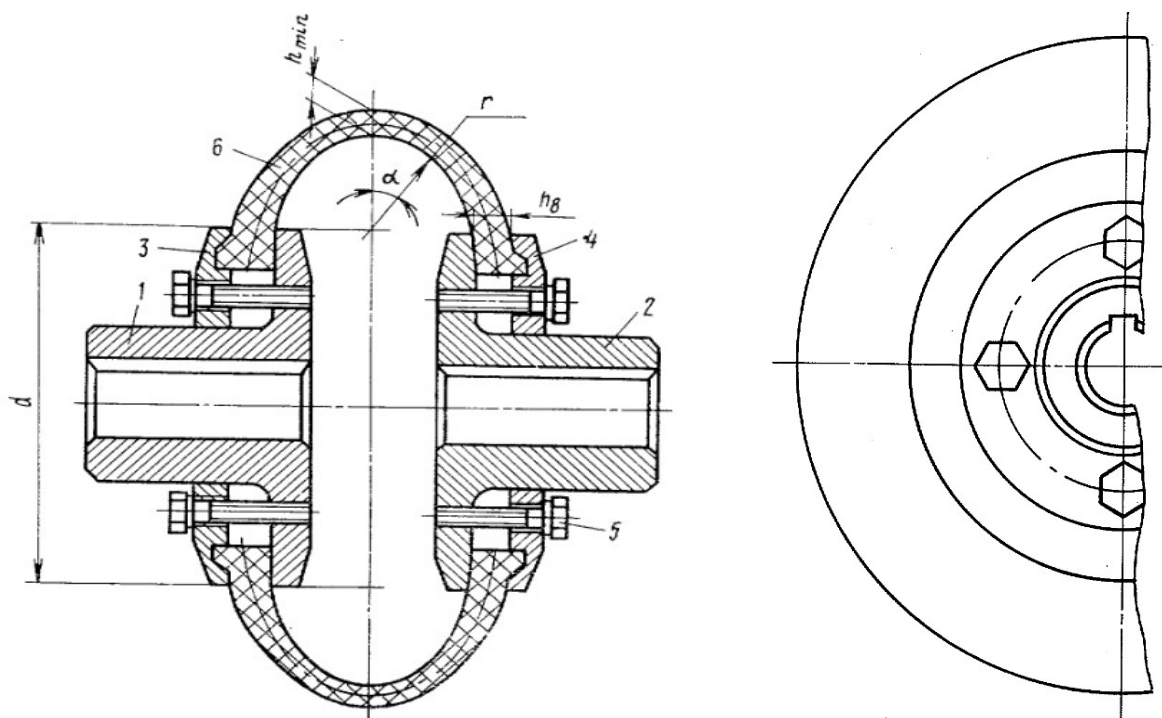


Рисунок 6 - Муфта с упругой торообразной оболочкой

Напряжения, изменяемые по сечению торообразного элемента, определяются по формуле

$$\tau = \frac{M}{2\pi(d + 2r \cos \alpha)^2 h}, \quad (2)$$

где  $\tau$  – касательная напряжения в сечениях;  
 $h$  – толщина торообразного элемента;  
 $\alpha$  – полярный угол.

Исходя из условия равной прочности, приравнивая уравнения (1) и (2), получают зависимость изменения толщины торообразного элемента от полярного угла

$$h = \frac{h_3 d^2}{(d + 2r \cos \alpha)}. \quad (3)$$

Толщина торообразного элемента  $h$  в месте перегиба является минимальной и выбирается из условия передачи крутящего момента, так как изгибающие напряжения в середине сечения при радиальном смещении валов отсутствуют. Таким образом, минимальная толщина тора, как следует из формулы (1), при  $\alpha = 0$  составляет

$$h_{\min} = \frac{h_3 d^2}{(d + 2r)^2}. \quad (4)$$

При вращении полумуфты крутящий момент передается через упругую оболочку 6, прикрепленную к полумуфтам 1 и 2 прижимными кольцами 3 и 4 и винтами 5, на полумуфту 2.

Муфта за счет переменной толщины торообразной оболочки позволяет передавать большие крутящие моменты и одновременно компенсировать значительные радиальные и осевые смещения соединяемых валов при сохранении высоких прочностных свойств.

Применение торообразной оболочки переменной толщины, уменьшающейся к середине сечения, обеспечивает более равномерное напряженное состояние в торе при смещении полумуфт.

## 2. Технические решения муфт с металлическими упругими элементами

Не меньшее количество конструкций муфт имеет в своем составе металлические упругие элементы. Они отличаются меньшей податливостью и бóльшим весом, но менее подвержены старению и изменению упругих свойств при колебаниях температуры. В качестве упругих элементов в муфтах используются пружины, торсионы, упругие стержни, тросовые элементы и элементы из проволоочной сетки. На начальном этапе эволюции конструкций широко использовались пружины, как, например, в муфте [29] (рисунок 7).

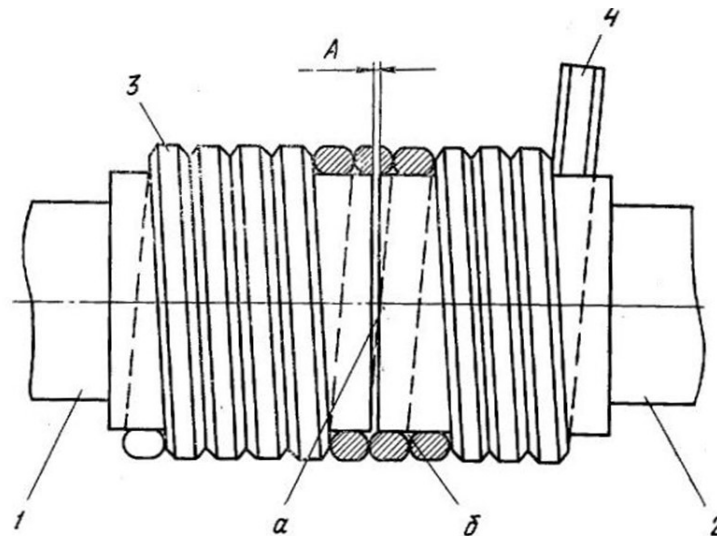


Рисунок 7 - Муфта с пружинным соединением полумуфт

Муфта содержит ведущую 1 и ведомую 2 полумуфты, установленные с зазором  $a$  между их торцами. На полумуфтах установлена цилиндрическая винтовая пружина 3, витки которой при плотной навивке образуют винтовой канал  $б$ , в котором размещено достаточное количество смазки.

Пружина 3 имеет отогнутый конец 4 для управления режимом работы муфты.

Пружина надевается на полумуфты с натягом, при вращении ведущей полумуфты в направлении навивки пружины силы трения от натяга завивают пружину, которая еще сильнее обжимает полумуфты и без проскальзывания передает крутящий момент.

В результате смазка, находящаяся между полумуфтой и соприкасающейся с ней поверхностью пружины, выжимается в винтовой канал и удерживается там до момента расслабления пружины и расцепления ведомой и ведущей полумуфт.

При торможении конца 4 пружины или при вращении полумуфты 1 в сторону, обратную навивке пружины, силы трения стремятся ослабить пружину, и полумуфта свободно поворачивается внутри нее. В момент расслабления находящаяся в канале смазка увлекается вращающимися элементами и перемещается в образовавшийся зазор между рабочими трущимися поверхностями полумуфт и пружины.

Такое перемещение автоматически повторяется в зависимости от режима работы муфты.

Представляется интересным техническое решение следующей пружинной муфты [30], в процессе работы которой постоянно изменяется диаметр пружины (рисунок 8).

Муфта содержит ведущую полумуфту 1, выполненную заодно с зубчатым колесом, связанным с редуктором, и ведомую полумуфту 2, установленные на валу 3. На встречно расположенные части полумуфт установлена пружина 4, имеющая в свободном состоянии внутренний диаметр меньше диаметров полумуфт, на которых она расположена.

Рабочая поверхность ведомой полумуфты образована цилиндрическим участком 5, имеющим диаметр больше диаметра цилиндрической рабочей части ведущей полумуфты, и переходным конусом 6, связывающим цилиндрическую часть со вторым цилиндрическим участком 7, диаметр которого примерно равен диаметру ведущей полумуфты.

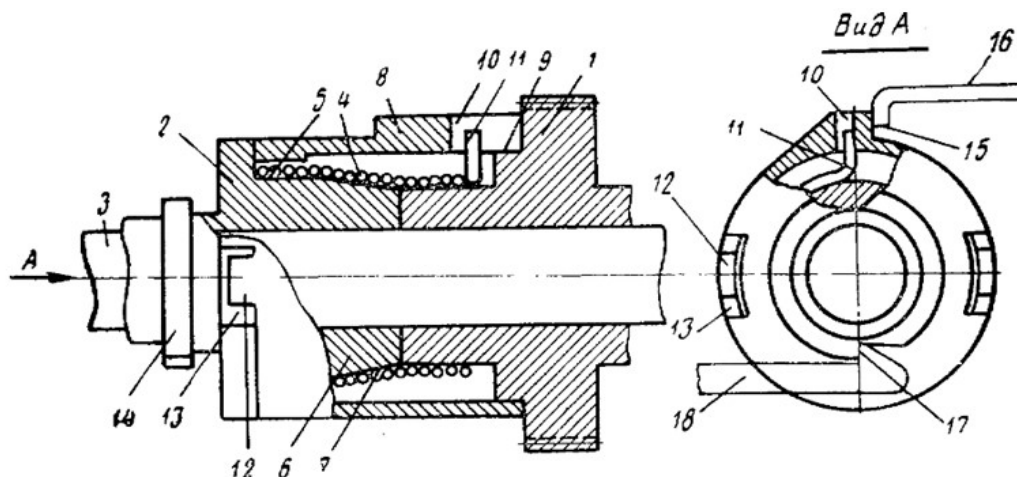


Рисунок 8 - Муфта с самозатягивающейся пружиной

Управляющая втулка 8 со стороны ведомой полумуфты свободно посажена на витки пружины, расположенные на участке 5 полумуфты 2. Со второй стороны втулка 8 расположена на уступе 9 полумуфты 1. Втулка 8 имеет паз 10, в который входит радиальный отгиб 11 пружины 4. Со стороны полумуфты 2 втулка 8 имеет торцовые выступы 12, входящие в необходимый зазор в торцовые пазы 13 на ведомой полумуфте.

Ведомая полумуфта выполнена заодно с фиксирующим кулачком 14.

На управляющей втулке 8 имеется стоповый выступ 15, который в расцепленном положении муфты опирается на стоповый рычаг 16. Выступ 17 фиксирующего кулачка 14 в расцепленном положении муфты опирается на фиксирующую собачку 18.

Во время работы в сцепленном состоянии пружина 4 самозатягивается вокруг полумуфт, и все детали муфты находятся в непрерывном вращении.

Для приведения муфты в расцепленное состояние под стоповый выступ 15 управляющей втулки 8 подводится стоповый рычаг 16. Управляющая втулка останавливается на пути радиального отгиба пружины 4, продолжающей вращаться под действием сил инерции вместе с ведомой полумуфтой. Процесс самозатягивания пружины нарушается, и она начинает увеличиваться в диаметре.

К концу поворота ведомой полумуфты относительно неподвижной управляющей втулки 8 поворот ограничивается упором стенки торцового паза 13 ведомой полумуфты в

торцовый выступ 12 управляющей втулки. За выступ 17 фиксирующего кулачка 14 западает фиксирующая собачка 18, и пружина 4 остается в раскрученном состоянии.

Между пружинной и непрерывно вращающейся ведущей полумуфтой образуется зазор, который сохраняется в течение всего периода расцепления муфты, в результате чего передача крутящего момента прекращается. Зазор образуется также между пружинной и цилиндрическим участком 7 ведомой полумуфты.

Однако между пружинной и участком 5 ведомой полумуфты натяг не нарушается, так как диаметр пружины после раскручивания остается меньше диаметра участка 5.

Распространенными упругими элементами в конструкциях упругих муфт являются также устанавливаемые между полумуфтами упругие металлические диски. Примером может служить техническое решение [31] упругой муфты с профилированным упругим диском. На рисунок 9, а представлен поперечный разрез муфты; на рисунок 9, б – разрез А-А; на рисунок 9, в – поперечный разрез муфты с профилированным диском; на рисунок 9, г – разрез Б-Б. Муфта содержит ведущую 1 и ведомую 2 полумуфты, установленные соответственно на ведущем 3 и ведомом 4 валах и взаимодействующие через упругое звено в виде упругого волнообразного диска 5.

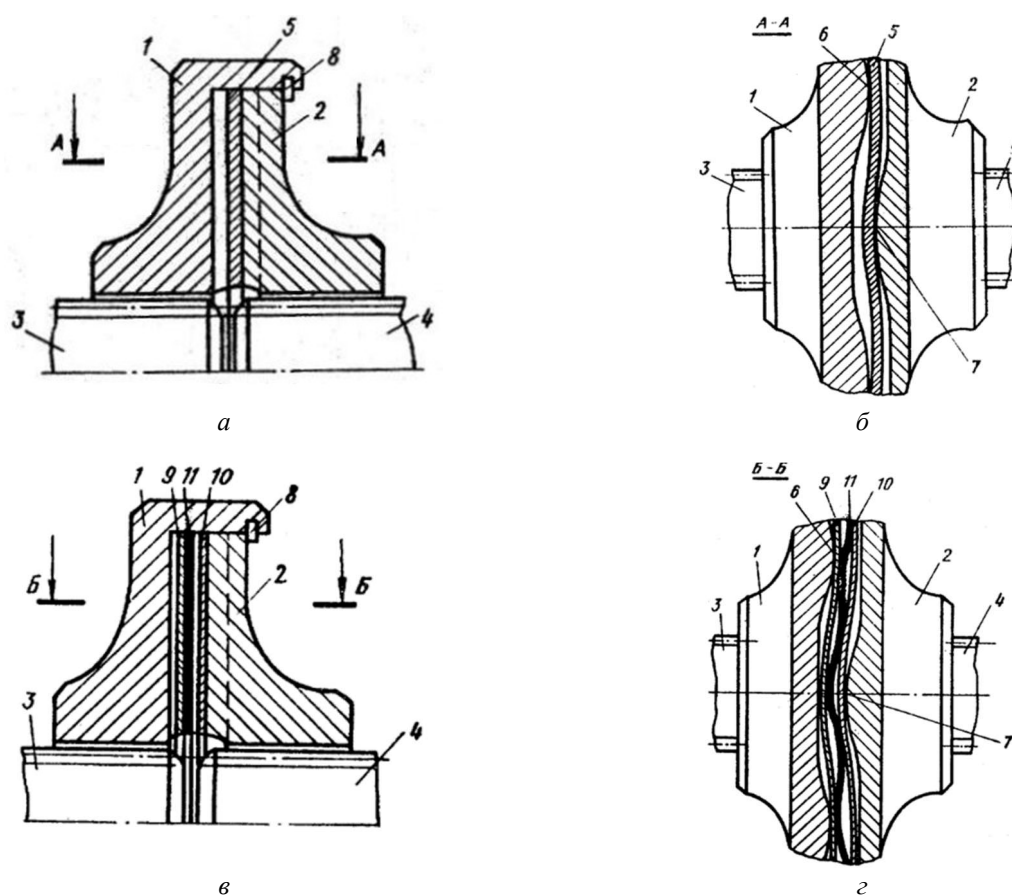


Рисунок 9 - Муфта с волнообразным диском

Ведущая 1 и ведомая 2 полумуфты имеют волнообразные торцовые поверхности с выступами 6 и 7 соответственно, причем выступы 6 ведущей полумуфты 1 расположены между выступами 7 ведомой полумуфты 2 с зазором. При сборке муфты упругий диск 5 устанавливается с предварительной деформацией выступами 6 и 7, а полумуфты фиксируются от осевого перемещения при помощи стопорного кольца 8. Упругое звено может состоять из двух или более дисков 9 и 10, между которыми размещен профилированный диск 11, жесткость которого выше жесткости дисков 9 и 10.

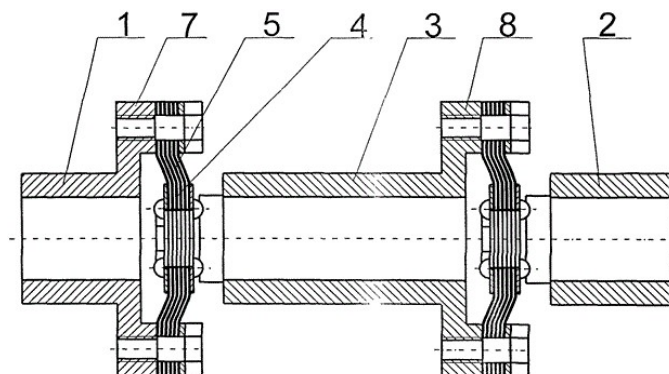
Во время работы крутящий момент от ведущего вала 3 передается на ведущую полумуфту 1, от нее через упругий диск – на ведомую полумуфту 2 и ведомый вал 4.

При резком изменении крутящего момента полумуфта 1 проворачивается на некоторый угол относительно полумуфты 2. Выступы 6 и 7 полумуфт сближаются, изгибая упругий диск 5, который и воспринимает колебания нагрузки на валах. Исполнение упругого элемента 11 в



виде пакета дисков способствует повышению внутреннего трения в муфте и большему рассеиванию энергии колебаний, т.е. лучшему демпфированию.

В техническом решении [32] муфты (рисунок 10) также в качестве упругого элемента использованы пакеты профилированных металлических дисков.



**Рисунок 10 - Упругая муфта:** 1, 2 – полумуфты; 3 – вилка; 4 – пакет профилированных металлических дисков; 5 – боковая полка; 7, 8 – участки с отверстиями для крепления соединительных элементов

При передаче крутящего момента работают боковые полки 10 плоских пружин 9, благодаря изгибу которых происходит компенсация радиальной и угловой несоосностей концов соединяемых валов, гасятся шум и вибрация, возникающие при работе элементов механизма, а применение вибропоглощающих прокладок 12 дополнительно усиливает эффект гашения шума и вибрации. Количество пружин 9 в пакете, их толщина, длина и ширина полков 10, а также угол отгиба подбираются исходя из эксплуатационных требований, предъявляемых к муфте.

Таким образом, предложенное техническое решение позволяет уменьшить шум и вибрации муфты в процессе ее эксплуатации при одновременной значительной компенсации радиальной и угловой несоосностей соединяемых валов.

### 3. Техническое решение предложенной авторами муфты

В составе силовых передач гусеничных машин одним из самых нагруженных является комплекс узлов ведущего моста, детали которого постоянно подвергаются динамическим нагрузкам с широким спектром частот в большом диапазоне изменения амплитуд. В ряде случаев коэффициент динамичности этих нагрузок составляет 2,5-3. Для снижения динамической нагруженности участков валопровода ведущего моста таких машин авторами настоящей статьи предложено ввести в состав моста упругую муфту с комплексной линейно-нелинейной упругой характеристикой [33], которая обеспечивает снижение пиковой динамической нагруженности его деталей.

На рисунке 11, а показан вид муфты с торца; на рисунок 11, б – вид установленных между полумуфтами пакетов плоских пружин; на рисунок 10, в – вид муфты с другого торца; на рисунок 10, г – схема углового расположения пакетов; на рисунок 10, д – упругая характеристика муфты.

Упругая муфта для силовой передачи тягово-транспортного средства (Рисунок 10) содержит ведущую полумуфту 1, ведомую полумуфту 2, расположенные в два ряда вдоль оси муфты пакеты плоских пружин, в первом ряду 3 пакеты плоских пружин 4 (Рисунок 10, а и б) одним концом вставляются во впадины 5 между равномерно по углу поворота расположенными зубьями 6 ведомой полумуфты 2, а другим жестко крепятся в ведущей полумуфте 1, во втором ряду 7 пакеты плоских пружин 8 (Рисунок 10, в) одним концом жестко крепятся в ведущей полумуфте 1, а другим вставляются во впадины 9 между неравномерно по углу поворота расположенными зубьями 10 ведомой полумуфты 2, причем относительно положения, соответствующего выбору полного упругого хода всех пакетов плоских пружин первого ряда первый пакет 11 плоских пружин второго ряда 7 смещен по углу поворота на один градус, второй пакет 12 плоских пружин второго ряда 7 – на два градуса, третий пакет 13 плоских пружин второго ряда 7 – на три градуса, четвертый пакет 14 плоских пружин второго ряда 7 – на четыре градуса, пятый пакет 15 плоских пружин второго ряда 7 – на пять градусов, шестой пакет 16 плоских пружин второго ряда 7 – на шесть градусов, седьмой пакет 17 плоских пружин второго ряда 7 – на семь градусов, восьмой пакет 18 плоских пружин второго ряда 7 – на восемь градусов.

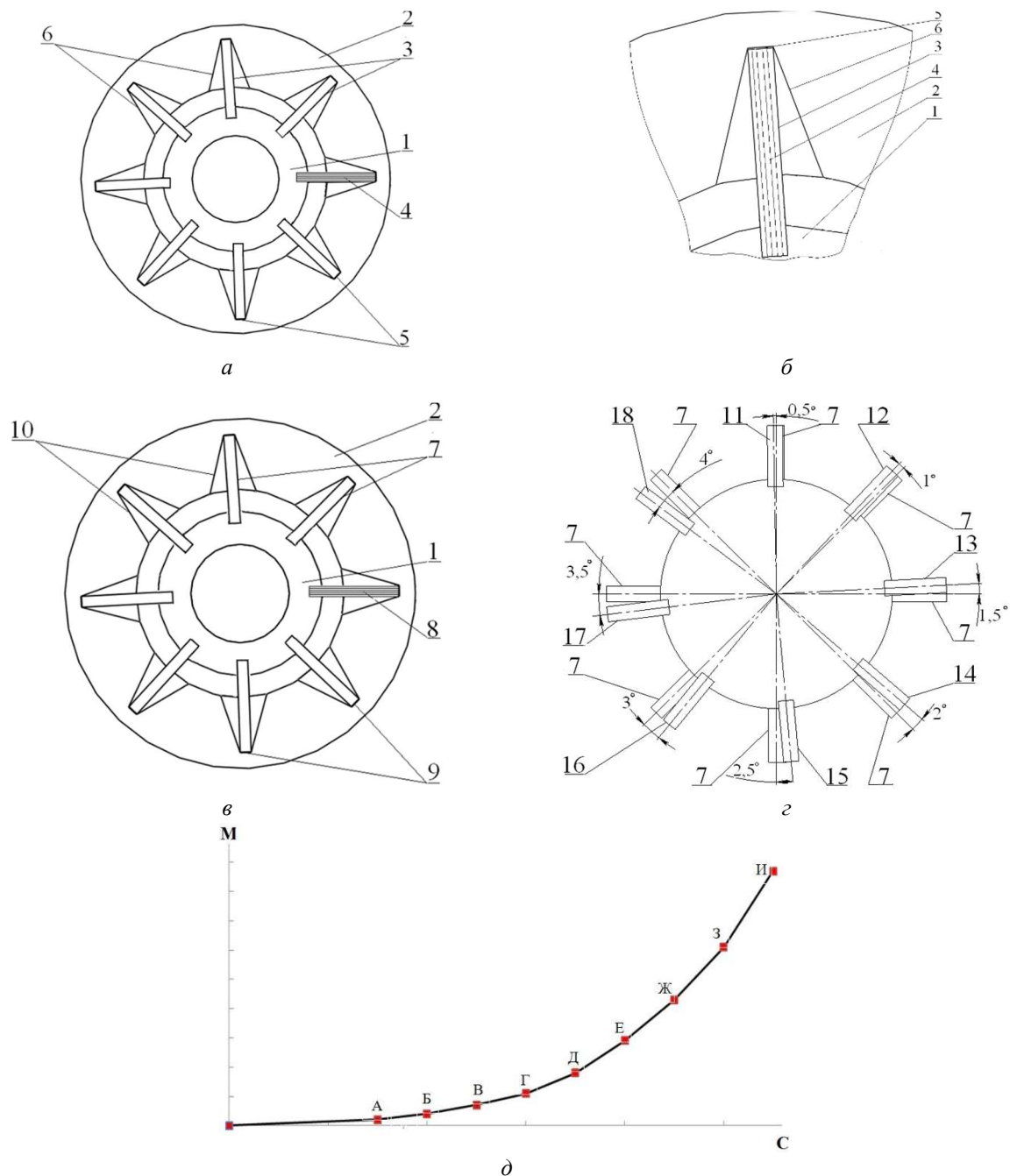


Рисунок 11 - Упругая муфта для силовой передачи тягово-транспортного средства

Основным назначением упругой муфты является снижение пиковой динамической нагруженности силовой передачи как на установившихся (прямолинейное движение с постоянными средней скоростью и тяговым усилием), так и на неустановившихся режимах движения с резкими изменениями скорости, тягового сопротивления или направления движения; при этом динамическая нагруженность силовой передачи может в 2-3 раза превышать номинальный уровень ее нагруженности. Снижение динамической нагруженности силовой передачи на установившихся режимах движения, на которых ее средняя величина обычно находится в границах номинальной нагруженности, может обеспечиваться муфтой с линейной упругой характеристикой, а снижение на неустановившихся режимах наиболее эффективно обеспечивает муфта с нелинейной прогрессивной упругой характеристикой.

На режиме движения, когда динамическая нагруженность силовой передачи тягово-транспортного средства не превышает номинальную, крутящий момент от ведущей полумуфты 1 к ведомой полумуфте 2 (рисунок 11, а) передается посредством первого ряда 3 пакетов плоских пружин 4 (рисунок 11, а и б); на этом режиме упругая характеристика муфты является линейной (см. участок от 0 до точки А на рисунок 11, д).

На режимах движения, когда динамическая нагруженность превышает номинальную, в передачу момента от ведущей 1 к ведомой 2 полумуфтам (Рисунок 10, а) параллельно с первым рядом 3 пакетов пружин 4 включается второй ряд 7 пакетов пружин 8 (рисунок 10, в), причем количество включаемых в передачу момента пакетов пружин второго ряда 7 зависит от соотношения действующей и номинальной динамической нагруженности участка передачи, где установлена упругая муфта: если действующая динамическая нагруженность участка находится в диапазоне 1,0-1,2 от номинальной, включается первый пакет 11 пружин второго ряда 7 (Рисунок 10, в), на графике упругой характеристики (рисунок 10, д) это соответствует участку АБ; если в диапазоне 1,2-1,4 от номинальной – пакеты с 11 по 12 второго ряда 7 (участок БВ на графике); если в диапазоне 1,4-1,6 от номинальной – пакеты с 11 по 13 второго ряда 7 (участок ВГ на графике); если в диапазоне 1,6-1,8 от номинальной – пакеты с 11 по 14 второго ряда 7 (участок ГД на графике); если в диапазоне 1,8-2,0 от номинальной – пакеты с 11 по 15 второго ряда 7 (участок ДЕ на графике); если в диапазоне 2,0-2,2 от номинальной – пакеты с 11 по 16 второго ряда 7 (участок ЕЖ на графике); если в диапазоне 2,2-2,4 от номинальной – пакеты с 11 по 17 второго ряда 7 (участок ЖЗ на графике); если в диапазоне 2,4-2,6 от номинальной пакеты с 11 по 18 второго ряда 7 (участок ЗИ на графике).

Вследствие этого обеспечивается получение комплексной упругой характеристики муфты, включающей в себя (рисунок 11, д) линейный участок от 0 до точки А и нелинейный участок от точки А до точки И с прогрессивным характером изменения крутильной жесткости в зависимости от величины передаваемого крутящего момента, что обеспечивает более эффективную защиту силовой передачи от пиковых динамических нагрузок как на установившихся, так и неустановившихся режимах движения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование динамической нагруженности участков силовой передачи трактора Четра 6С-315 / В.В. Шеховцов, Н.С. Соколов-Добрев, И.А. Иванов, А.В. Калмыков // Изв. ВолгГТУ. Серия "Наземные транспортные системы". Вып. 5: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – № 2. – С. 47-50.
2. Research of dynamic characteristics of Chetra-6C315 tractors power transmission / А.В. Калмыков, П.В. Потапов, В.В. Шеховцов, Е.В. Клементьев, Н.С. Соколов-Добрев // 31st Seminar of the Students Association for Mechanical Engineering, Warsaw, Poland, May 22nd – 25th, 2012: book of Abstracts / Military University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering. – Warsaw, 2012. – P. 21–22.
3. Снижение динамической нагруженности трансмиссии трактора за счет ввода упругого реактивного звена / А.В. Калмыков, В.В. Шеховцов, Н.С. Соколов-Добрев, М.В. Ляшенко // Известия ВолгГТУ. Серия "Наземные транспортные системы". Вып. 7: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – № 21 (124). – С. 24-28.
4. Крутильные колебания от основных эксплуатационных нагрузок в валопроводе силовой передачи трактора ВТ-100 / В.В. Шеховцов, М.В. Ляшенко, Вл.П. Шевчук, Н.С. Соколов-Добрев, К.В. Шеховцов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2013. – № 7 (ч. 2). – С. 125-128.
5. Исследование динамических характеристик трансмиссии сельскохозяйственного трактора 6-ого тягового класса / Вл.П. Шевчук, В.В. Шеховцов, Е.В. Клементьев, Н.С. Соколов-Добрев, А.В. Калмыков // Современные наукоемкие технологии. – 2013. – № 2. – С. 44-49.
6. Исследование динамических процессов в силовой передаче гусеничного трактора тягового класса 6 при повороте / А.В. Калмыков, В.В. Шеховцов, Н.С. Соколов-Добрев, К.О. Долгов // Прогресс транспортных средств и систем – 2013: матер. междунар. науч.-практ. конф., Волгоград, 24-26 сент. 2013 г. / ВолгГТУ [и др.]. – Волгоград, 2013. – С. 161-162.
7. Динамическая нагруженность силовых элементов трансмиссии гусеничного трактора при эксплуатации в режиме "разгон – остановка" / Е.И. Тескер, В.В. Шеховцов, В.Ю. Тараненко, К.П. Подшивалин // Тракторы и сельхозмашины. – 2013. – № 8. – С. 21-23.
8. Влияние динамической связанности звеньев силовой цепи на характер распространения крутильных колебаний в валопроводе / В.В. Шеховцов, М.В. Ляшенко, Вл.П. Шевчук, Н.С. Соколов-Добрев, К.В. Шеховцов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2013. – № 7 (ч. 2). – С. 128-131.
9. The Computational Research of the Dynamic Load of the Power Train Sites of the Caterpillar Tractor = Расчётные исследования динамической нагруженности участков силовой передачи гусеничного трактора / В.В. Шеховцов, Н.С. Соколов-Добрев, Вл.П. Шевчук, М.В. Ляшенко, А.В. Калмыков // The Archives of Automotive Engineering / Archiwum Motoryzacji. – 2013. – Vol. 60, No. 2. – С. парал.: 79-91 (англ.); 195-208 (рус.).
10. Строкатов, М.А. Экспериментальное исследование нагруженности трансмиссии гусеничного трактора при синфазной и несинфазной установке ведущих колёс / М.А. Строкатов, В.В. Шеховцов, Н.С. Соколов-Добрев // Молодой учёный. – 2014. – № 8 (67, июнь-1), часть 3. – С. 262-267.
11. Строкатов, М.А. Экспериментальное исследование крутящего момента трактора ДТ-120 при трогании / М.А. Строкатов, В.В. Шеховцов // Тезисы докладов смотра-конкурса научных, конструкторских и технологических работ студентов Волгоградского государственного технического университета, Волгоград, май 2014 г. / редкол.: А.В. Навроцкий (отв. ред.) [и др.]; ВолгГТУ, СНТО. – Волгоград, 2014. – С. 110.
12. Перспективы использования упругого реактивного звена в силовой передаче трактора / А.В. Калмыков, В.В. Шеховцов, М.В. Ляшенко, Н.С. Соколов-Добрев, З.А. Годжаев // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – № 12. – С. 20-24.

13. Динамическая нагруженность силовой передачи трактора при изменении крутильной жёсткости реактивного звена / А.В. Калмыков, Н.С. Соколов-Добрев, В.В. Шеховцов, М.В. Ляшенко // Технология колёсных и гусеничных машин. – 2014. – № 5. – С. 17-23.
14. Метод снижения динамической нагруженности силовой передачи гусеничного трактора / Н.С. Соколов-Добрев, В.В. Шеховцов, М.В. Ляшенко, А.В. Калмыков // Вестник машиностроения. – 2015. – № 6. – С. 6-10.
15. Использование в трансмиссии трактора реактивного звена с переменной податливостью / А.В. Калмыков, М.В. Ляшенко, Н.С. Соколов-Добрев, В.В. Шеховцов // Известия ВолгГТУ. Сер. Наземные транспортные системы. Вып. 12. – Волгоград, 2015. – № 6 (166). – С. 24-32.
16. Шеховцов, В.В. Анализ и синтез динамических параметров элементов силовых передач тягово-транспортных средств: учеб. пособ. (гриф). Доп. УМО вузов РФ по образованию в области транспортных машин и транспортно-технологических комплексов / В.В. Шеховцов, Н.С. Соколов-Добрев, М.В. Ляшенко; ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – 140 с.
17. Шеховцов, В.В. Decreasing of the Dynamic Loading of Tractor Transmission by Means of Change of the Reactive Element Torsional Stiffness / В.В. Шеховцов, Н.С. Соколов-Добрев, П.В. Потапов // Procedia Engineering. Vol. 150: 2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016) / ed. by A.A. Radionov. – [Elsevier publishing], 2016. – P. 1239-1244.
18. Снижение динамической нагруженности трансмиссии тягово-транспортного средства за счет элемента с управляемыми упруго-диссипативными свойствами / З.А. Годжаев, В.В. Шеховцов, М.В. Ляшенко, А.И. Исканиев, Шиян Я.Э. Энрикес // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2021. – № 5 (349). – С. 157-164. – DOI: 10.33979/2073-7408-2021-349-5-157-164.
19. Могилевская, Е.А. Установка упругой муфты в трансмиссию сельскохозяйственного трактора класса 6 / Е.А. Могилевская, В.В. Шеховцов // Проектирование колёсных машин: матер. всерос. науч.-техн. конф., посвящ. 100-летию начала подгот. инж. по автомобильной специальности в МГТУ им. Н.Э. Баумана (25-26 дек. 2009 г.) / ГОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". – М., 2010. – С. 167.
20. Могилевская, Е.А. Установка упругой муфты в трансмиссию гусеничного трактора класса 6 / Е.А. Могилевская, Н.С. Соколов-Добрев, В.В. Шеховцов // Инновационные технологии в обучении и производстве: матер. VI всерос. науч.-практ. конф., г. Камышин, 15-16 дек. 2009 г. В 6 т. Т. 3 / ГОУ ВПО ВолгГТУ, КТИ (филиал) ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – С. 68-69.
21. П. м. 116411 РФ, МПК В 60 К 17/02. Устройство для управления жёсткостью трансмиссии транспортного средства / В.В. Шеховцов, М.В. Ляшенко, Вл.П. Шевчук, Н.С. Соколов-Добрев, А.В. Калмыков, А.О. Пивоваров; ВолгГТУ. – 2012.
22. П. м. 201977 РФ, МПК F16D 3/52, F16D 3/20, F16D 3/21, F16D 3/27. Упругая муфта / Э.Ш.Э. Энрикес, В.В. Шеховцов, Н.С. Соколов-Добрев, А.И. Исканиев; ВолгГТУ. – 2021.
23. А.с. 662758 СССР, МПК F16D 3/68. Упругая муфта / В.Т. Атаманов, Ю.И. Новиков, В.Г. Шаруда. – 1979.
24. А.с. 1073504 СССР, МПК F16D 3/58. Упругая муфта / В.С. Кузьмин. – 1984.
25. А.с. 510942 СССР, МПК F16D 3/56. Компенсирующая муфта / А.И. Кравченко, П.Е. Сергиенко. – 1987.
26. А.с. 681256 СССР, МПК F16D 3/48. Упругая пальцевая муфта. / А.А. Головин. – 1979.
27. А.с. 681257 СССР, МПК F16D 3/56. Упругая муфта / М.С. Тривайло. – 1979.
28. А.с. 1109547 СССР, МПК F16D 3/74. Упругая муфта / А.В. Гостев, Е.А. Артемьев, В.Е. Шабанов. – 1984.
29. А.с. 388145 СССР, МПК F16D 11/02, F16D 13/08. Пружинная муфта / П.И. Хренков, В.М. Артамонов, Л.И. Воронов. – 1973.
30. А.с. 410182 СССР, МПК F16D 11/02. Пружинная муфта / Ю.К. Сазонов. – 1974.
31. А.с. 1157289 СССР, МПК F16D 41/20, F16D 3/74. Упругая муфта. / В.А. Дьяченко, А.И. Стефанович, Н.И. Афанасьев, А.Д. Ефимов. – 1985.
32. Пат. 2533007 РФ, МПК F16D 3/04, F16D 3/56. Муфта упругая / Н.В. Галышкин. – 2014.
33. П.м. 184456 РФ, МПК F16D 3/50, F16D 3/56. Упругая муфта для силовой передачи тягово-транспортного средства / В.В. Шеховцов, А.А. Пушкарев, П.В. Потапов, М.В. Ляшенко и др. – 2018.

**Годжаев Захид Адыгезалович**  
доктор технических наук,  
профессор, член-корреспондент  
РАН, заместитель директора  
ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, 109428,  
РФ, г. Москва, 1-й  
Институтский проезд, дом 5, тел.  
(499) 171-43-49, fic51@mail.ru.

**Шеховцов Виктор Викторович**  
доктор технических наук,  
профессор, профессор кафедры  
«Техническая эксплуатация и  
ремонт автомобилей»  
Волгоградского государственного  
технического университета,  
400005, РФ, г. Волгоград, пр-т  
Ленина, 28, тел. (8442) 24-81-16,  
shehovtsov@vstu.ru

**Ляшенко Михаил Вольфредович**  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Техническая  
эксплуатация и ремонт автомобилей»  
Волгоградского государственного  
технического университета, 400005,  
РФ, г. Волгоград, пр-т Ленина, 28,  
тел. (8442) 24-81-62, tslmv@vstu.ru

**Потапов Павел Викторович**  
доцент кафедры «Техническая  
эксплуатация и ремонт  
автомобилей» Волгоградского  
государственного технического  
университета, 400005, РФ, г.  
Волгоград, пр-т Ленина, 28, тел.  
(8442) 24-81-62,  
paulflinx@gmail.com

**Исканиев Азамат Ибрагимович**  
старший преподаватель кафедры  
«Теплотехника и гидравлика»  
Волгоградского государственного  
технического университета,  
400005, РФ, г. Волгоград, пр-т  
Ленина, 28, тел. (8442) 24-81-09,  
ts@vstu.ru

**Пушкарев Александр Алексеевич**  
инженер ООО «ВолгаТЭКинжиниринг»,  
404199, Волгоградская область,  
Светлоярский район, с. Малые  
Чапурники, ул. Школьная, д. 28,  
ts@vstu.ru

Z.A. GODZHAEV, V.V. SHEKHOVTSOV, M.V. LIASHENKO,  
P.V. POTAPOV, A.I. ISKALIEV, A.A. PUSHKAREV

## TECHNICAL SOLUTIONS OF ELASTIC COUPLINGS FOR DRIVETRAINS OF TRANSPORT AND TRACTION VEHICLES

**Abstract.** *This paper describes schemes of elastic couplings for drivetrains of traction and transport vehicles. In operation, a whole complex of dynamic loads with a wide range of amplitudes and a spectrum of frequencies acts on the parts of mechanical drivetrains of wheeled and tracked vehicles. To reduce the dynamic load of parts, elastic and damping elements are included in the drivetrains. Among them, the most common are elastic couplings, which cut off peaks of dynamic loads, reduce dynamic effects from changes in the spatial arrangement of parts under the action of variable loads (shaft misalignment, deformations and displacements of contacting pairs), and provide detuning from resonances. The authors performed a review of elastic couplings proposed by Russian authors, with an analysis of designs that allows to trace their evolution. Technical solutions of couplings with rubber elastic elements, including disks and star-shaped elements made of rubber, with rubber bushings, sleeve-finger couplings and couplings with elastic elements of the shell type are considered. Also designs of couplings with metal elastic elements including those with various springs and sets of elastic profiled disks, are considered. Description of new technical solution of elastic coupling for traction and transport vehicle with a complex linear-nonlinear elastic characteristic, created and patented by the authors, is presented. Its design provides a reduction in the dynamic load of the drivetrain both in steady-state and non-steady-state modes of operation of the traction vehicle.*

**Keywords:** *elastic coupling, traction and transport vehicles, rubber elastic elements, metal elastic elements, dynamic load, reduction of loading.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Issledovanie dinamicheskoy nagruzhennosti uchastkov silovoj peredachi traktora Chetra 6S-315 / V.V. SHEkhovcov, N.S. Sokolov-Dobrev, I.A. Ivanov, A.V. Kalmykov // *Izv. VolgGTU. Seriya "Nazemnye transportnye sistemy"*. Vyp. 5: mezhvuz. sb. nauch. st. / VolgGTU. – Volgograd, 2012. – № 2. – С. 47-50.
2. Research of dynamic characteristics of Chetra-6S315 tractors power transmission / A.V. Kalmykov, P.V. Potapov, V.V. SHEkhovcov, E.V. Klement'ev, N.S. Sokolov-Dobrev // 31st Seminar of the Students Association for Mechanical Engineering, Warsaw, Poland, May 22nd – 25th, 2012: book of Abstracts / Military University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering. – Warsaw, 2012. – P. 21–22.
3. Snizhenie dinamicheskoy nagruzhennosti transmissii traktora za schet vvoda uprugogo reaktivnogo zvena / A.V. Kalmykov, V.V. SHEkhovcov, N.S. Sokolov-Dobrev, M.V. Lyashenko // *Izvestiya VolgGTU. Seriya "Nazemnye transportnye sistemy"*. Vyp. 7: mezhvuz. sb. nauch. st. / VolgGTU. – Volgograd, 2013. – № 21 (124). – С. 24-28.
4. SHEkhovcov, V.V. Analiz i sintez dinamicheskikh harakteristik avtotraktornykh silovykh peredach i sredstv dlya ih ispytaniya: monografiya / V.V. SHEkhovcov; VolgGTU. – Volgograd: RPK «Politehnik», 2004. – 224 s.
5. SHEkhovcov, V.V. Sovershenstvovanie avtotraktornykh silovykh peredach na osnove analiza i sinteza ih dinamicheskikh harakteristik na etape proektirovaniya: Dis... d-ra tekhn. nauk: 05.05.03. Volgograd, 2004. – 399 c.
6. The Computational Research of the Dynamic Load of the Power Train Sites of the Caterpillar Tractor = Raschyotnye issledovaniya dinamicheskoy nagruzhennosti uchastkov silovoj peredachi gusenichnogo traktora / V.V. SHEkhovcov, N.S. Sokolov-Dobrev, V.I.P. SHEvchuk, M.V. Lyashenko, A.V. Kalmykov // *The Archives of Automotive Engineering / Archiwum Motoryzacji*. – 2013. – Vol. 60, No. 2. – С. paral.: 79-91 (angl.); 195-208 (rus.).
7. Dinamicheskaya nagruzhennost silovykh elementov transmissii gusenichnogo traktora pri ekspluatacii v rezhime "razgon – ostanovka" / E.I. Tesker, V.V. SHEkhovcov, V.YU. Taranenko, K.P. Podshivalin // *Traktory i sel'hozmashiny*. – 2013. – № 8. – С. 21-23.
8. Vliyaniye dinamicheskoy svyazannosti zvenev silovoy cepi na karakter rasprostraneniya krutil'nykh kolebanij v valoprovode / V.V. SHEkhovcov, M.V. Lyashenko, V.I.P. SHEvchuk, N.S. Sokolov-Dobrev, K.V. SHEkhovcov // *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*. – 2013. – № 7 (ch. 2). – С. 128-131.
9. The Computational Research of the Dynamic Load of the Power Train Sites of the Caterpillar Tractor = Raschyotnye issledovaniya dinamicheskoy nagruzhennosti uchastkov silovoj peredachi gusenichnogo traktora / V.V. SHEkhovcov, N.S. Sokolov-Dobrev, V.I.P. SHEvchuk, M.V. Lyashenko, A.V. Kalmykov // *The Archives of Automotive Engineering / Archiwum Motoryzacji*. – 2013. – Vol. 60, No. 2. – С. paral.: 79-91 (angl.); 195-208 (rus.).
10. Stokatov, M.A. Eksperimentalnoe issledovanie nagruzhennosti transmissii gusenichnogo traktora pri sinfaznoj i nesinfaznoj ustanovke vedushchih kolyos / M.A. Stokatov, V.V. SHEkhovcov, N.S. Sokolov-Dobrev // *Molodoj uchyonyj*. – 2014. – № 8 (67, iyun-1), chast 3. – С. 262-267.
11. Stokatov, M.A. Eksperimentalnoe issledovanie krutyashchego momenta traktora DT-120 pri troganii / M.A. Stokatov, V.V. SHEkhovcov // *Tezisy dokladov smotra-konkursa nauchnykh, konstruktorskiy i tekhnologicheskikh rabot studentov Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, Volgograd, maj 2014 g.* / redkol.: A.V. Navrockij (otv. red.) [i dr.]; VolgGTU, SNTU. – Volgograd, 2014. – С. 110.
12. Perspektivy ispolzovaniya uprugogo reaktivnogo zvena v silovoj peredache traktora / A.V. Kalmykov, V.V. SHEkhovcov, M.V. Lyashenko, N.S. Sokolov-Dobrev, Z.A. Godzhaev // *Traktory i sel'hozmashiny*. – 2014. – № 12. – С. 20-24.
13. Dinamicheskaya nagruzhennost silovoj peredachi traktora pri izmenenii krutil'noj zhyostkosti reaktivnogo zvena / A.V. Kalmykov, N.S. Sokolov-Dobrev, V.V. SHEkhovcov, M.V. Lyashenko // *Tekhnologiya ko-lyosnykh i gusenichnykh mashin*. – 2014. – № 5. – С. 17-23.
14. Metod snizheniya dinamicheskoy nagruzhennosti silovoj peredachi gusenichnogo traktora / N.S. Sokolov-Dobrev, V.V. SHEkhovcov, M.V. Lyashenko, A.V. Kalmykov // *Vestnik mashinostroeniya*. – 2015. – № 6. – С. 6-10.

15. Ispolzovanie v transmissii traktora reaktivnogo zvena s peremennoj podatlivostyu / A.V. Kalmykov, M.V. Lyashenko, N.S. Sokolov-Dobrev, V.V. Shekhovcov // Izvestiya VolgGTU. Ser. Nazemnye transportnye sistemy. Vyp. 12. – Volgograd, 2015. – № 6 (166). – С. 24-32.
16. Shekhovcov, V.V. Analiz i sintez dinamicheskikh parametrov elementov silovykh peredach tyagovo-transportnykh sredstv: ucheb. posob. (grif). Dop. UMO vuzov RF po obrazovaniyu v oblasti transportnykh ma-shin i transportno-tekhnologicheskikh kompleksov / V.V. Shekhovcov, N.S. Sokolov-Dobrev, M.V. Lyashenko; VolgGTU. – Volgograd, 2016. – 140 s.
17. Shekhovcov, V.V. Decreasing of the Dynamic Loading of Tractor Transmission by Means of Change of the Reactive Element Torsional Stiffness / V.V. Shekhovcov, N.S. Sokolov-Dobrev, P.V. Potapov // Procedia Engineering. Vol. 150: 2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016) / ed. by A.A. Radionov. – [Elsevier publishing], 2016. – P. 1239-1244.
18. Snizhenie dinamicheskoy nagruzhennosti transmissii tyagovo-transportnogo sredstva za schet elementa s upravlyaemyimi uprugodissipativnymi svojstvami / Z.A. Godzhaev, V.V. Shekhovcov, M.V. Lyashenko, A.I. Iskaliev, SHiyan YA.E. Enrikes // Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2021. – № 5 (349). – С. 157-164. – DOI: 10.33979/2073-7408-2021-349-5-157-164.
19. Mogilevskaya, E.A. Ustanovka uprugoy mufty v transmissiyu selskohozyajstvennogo traktora klassa 6 / E.A. Mogilevskaya, V.V. Shekhovcov // Proektirovanie kolyosnykh mashin: mater. vseros. nauch.-tekhn. konf., posvyashch. 100-letiyu nachala podgot. inzh. po avtomobilnoj specialnosti v MGTU im. N.E. Bauman (25-26 dek. 2009 g.) / GOU VPO "MGTU im. N.E. Bauman". – M., 2010. – С. 167.
20. Mogilevskaya, E.A. Ustanovka uprugoy mufty v transmissiyu gusenichnogo traktora klassa 6 / E.A. Mogilevskaya, N.S. Sokolov-Dobrev, V.V. Shekhovcov // Innovacionnye tekhnologii v obuchenii i proizvodstve: mater. VI vseros. nauch.-prakt. konf., g. Kamyshin, 15-16 dek. 2009 g. V 6 t. T. 3 / GOU VPO VolgGTU, KTI (filial) VolgGTU. – Volgograd, 2010. – С. 68-69.
21. P. m. 116411 RF, MPK B 60 K 17/02. Ustrojstvo dlya upravleniya zhyostkostyu transmissii transportnogo sredstva / V.V. Shekhovcov, M.V. Lyashenko, VI.P. Shevchuk, N.S. Sokolov-Dobrev, A.V. Kalmykov, A.O. Pivovarov; VolgGTU. – 2012.
22. P. m. 201977 RF, MPK F16D 3/52, F16D 3/20, F16D 3/21, F16D 3/27. Uprugaya mufta / E.SH.E. Enrikes, V.V. Shekhovcov, N.S. Sokolov-Dobrev, A.I. Iskaliev; VolgGTU. – 2021.
23. A.s. 662758 SSSR, MPK F16D 3/68. Uprugaya mufta / V.T. Atamanov, YU.I. Novikov, V.G. SHaru-da. – 1979.
24. A.s. 1073504 SSSR, MPK F16D 3/58. Uprugaya mufta / V.S. Kuzmin. – 1984.
25. A.s. 510942 SSSR, MPK F16D 3/56. Kompensiruyushchaya mufta / A.I. Kravchenko, P.E. Sergienko. – 1987.
26. A.s. 681256 SSSR, MPK F16D 3/48. Uprugaya palcevaya mufta. / A.A. Golovin. – 1979.
27. A.s. 681257 SSSR, MPK F16D 3/56. Uprugaya mufta / M.S. Trivajlo. – 1979.
28. A.s. 1109547 SSSR, MPK F16D 3/74. Uprugaya mufta / A.V. Gostev, E.A. Artemev, V.E. SHaba-nov. – 1984.
29. A.s. 388145 SSSR, MPK F16D 11/02, F16D 13/08. Pruzhinnaya mufta / P.I. Hrenkov, V.M. Arta-monov, L.I. Voronov. – 1973.
30. A.s. 410182 SSSR, MPK F16D 11/02. Pruzhinnaya mufta / YU.K. Sazonov. – 1974.
31. A.s. 1157289 SSSR, MPK F16D 41/20, F16D 3/74. Uprugaya mufta. / V.A. Dyachenko, A.I. Stefa-novich, N.I. Afanasev, A.D. Efimov. – 1985.
32. Pat. 2533007 RF, MPK F16D 3/04, F16D 3/56. Mufta uprugaya / N.V. Galyshkin. – 2014.
33. P.m. 184456 RF, MPK F16D 3/50, F16D 3/56. Uprugaya mufta dlya silovoj peredachi tyagovo-transportnogo sredstva / V.V. Shekhovcov, A.A. Pushkarev, P.V. Potapov, M.V. Lyashenko i dr. – 2018.

**Godzhaev Zakhid Adygezalovich**  
doctor in technical science, professor,  
Corresponding Member of RAS, vice  
director of FSBSI FSAC VIM,  
109428, Russia, Moscow, 1st  
Institutsky proezd, 5, tel (499)171-  
43-49, fic51@mail.ru.

**Shekhovtsov Viktor Viktorovich**  
doctor in technical science, professor,  
professor of "Vehicles and engines"  
department, Volgograd state  
technical university, 400005, RF,  
Volgograd, Lenin ave. 28, tel. (8442)  
24-81-62, shehovtsov@vstu.ru

**Liashenko Mikhail Volfredovich**  
doctor in technical science, professor,  
head of "Vehicles and engines"  
department, Volgograd state technical  
university, 400005, RF, Volgograd,  
Lenin ave. 28, tel. (8442) 24-81-62,  
tslmv@vstu.ru

**Potapov Pavel Viktorovich**  
candidate of technical science, docent  
at «Vehicles and engines»  
department, Volgograd state  
technical university, 400005, RF,  
Volgograd, Lenin ave. 28, tel. (8442)  
24-81-62, paulflinx@gmail.com

**Iskaliev Azamat Ibragimovich**  
post-graduate student at «Vehicles  
and engines» department, Volgograd  
state technical university, 400005,  
RF, Volgograd, Lenin ave. 28, tel.  
(8442) 24-81-62, tel. (8442) 24-81-  
62, ts@vstu.ru

**Pushkarev Aleksandr Alekseevich**  
engineer at LLC  
"VolgaTEKinzhiniring",  
404199, Volgograd region,  
Svetloyarskiy district, s. Malye  
Chapurniki, Shkolnaya st., 28,  
ts@vstu.ru

© З.А. Годжаев, В.В. Шеховцов, М.В. Ляшенко, П.В. Потапов, А.И. Искалиев, А.А. Пушкарев, 2024

С.И. РОЩУПКИН, Д.С. СОЛНЦЕВА

## РОЛЬ И МЕСТО 3D-СКАНИРОВАНИЯ В ТЕХНОЛОГИЯХ РАСПРЕДЕЛЁННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

**Аннотация.** При дистанционной работе зачастую возникает необходимость эффективного обмена информацией и предметами между удалёнными сотрудниками. В данной статье рассматривается возможность применения 3D-сканирования как инновационного метода при решении инженерных задач, позволяющего осуществлять процесс обмена данными в условиях распределённого проектирования.

**Ключевые слова.** технология, импортозамещение, индустрия 4.0 машиностроение, приборостроение реверс-инжиниринг, судостроение, моделирование, 3D-сканирование, аддитивные технологии.

### Введение

С развитием информационных технологий стал возможным переход на дистанционную работу во многих сферах, зачастую это явилось вынужденной мерой, как, например, при пандемии COVID-19.

В отчёте McKinsey Global Institute [2] представлен прогноз того, как пандемия COVID-19 может повлиять на будущее сферы труда в долгосрочной перспективе. Из него можно сделать основные выводы:

1. Пандемия показала, что работы с высокой степенью физического взаимодействия сотрудников оказались наиболее уязвимыми.

2. Удаленная работа, рост электронной коммерции и ускоренная автоматизация - ключевые тренды, усиленные пандемией, которые, вероятно, сохранятся и в будущем. Это приведет к значительным сдвигам в структуре занятости.

3. Для восьми стран с развитой экономикой может потребоваться около 100 млн работников новых профессий к 2030 году.

Из рассмотренных источников видно, что работа удаленного типа затрагивает все больше сфер и сфера инженерных разработок не является исключением.

Всё вышеизложенное обуславливает потребность в эффективных методах передачи информации и физических объектов между удалёнными сотрудниками. Традиционные методы доставки физических объектов часто являются неудобными, медленными и затратными.

Рассмотрим ряд сложностей в обмене данными, к которым привёл переход на дистанционную работу:

1. Ограниченный доступ к физическим ресурсам. Сотрудники, работающие из дома, могут испытывать затруднения в доступе к физическим документам, оборудованию и другим материальным ресурсам, что затрудняет обмен информацией.

2. Неэффективное использование инструментов обмена информацией. Недостаточное знание или неумение использовать специализированные инструменты для обмена данными может привести к потере времени и недопониманию.

Для преодоления сложностей в обмене данными в условиях дистанционной работы необходимо активно развивать и применять инновационные методы передачи информации.

### 1. 3D-сканирование как элемент Индустрии 4.0

Цифровая трансформация экономики в контексте Индустрии 4.0 основана на идее соединения физического мира с виртуальным в режиме реального времени. Переходя к Индустрии 4.0, производственные компании внедряют ряд решений, повышающих производительность и персонализирующих готовую продукцию [1]. Данные решения, сфокусированные на цифровой трансформации и автоматизации, позволяют значительно улучшить возможности удалённой работы в сфере инжиниринга. Важным элементом этих решений является технология 3D-сканирования. Этот инновационный метод позволяет создавать точные трехмерные модели объектов и пространств, что открывает новые возможности для удаленного взаимодействия и сотрудничества в сфере реверс-инжиниринга.

Вопросы использования реверс-инжиниринга в различных сферах освещены в работах [1-10]. Так, например, в работе [1] рассматриваются возможности применения обратного инжиниринга в контексте технологий Индустрии 4.0 (рисунок 1) и цифровой трансформации экономики. Автор систематизирует направления использования результатов реверс-



инжиниринга и выделяет три основные стратегии его применения: стратегию копирования в общем смысле и ее частные проявления; использование обратного инжиниринга как неотъемлемого элемента процесса 3D-моделирования; кастомизацию при помощи реверс-инжиниринга. Показано, что обратный инжиниринг в сочетании с аддитивным производством обеспечивает точное или улучшенное воспроизведение сложных деталей, а также позволяет реализовывать технологии виртуальной и дополненной реальности. Кроме того, автор демонстрирует, как проведение быстрого прототипирования в некоторых областях знаний (медицина, искусство, ювелирное дело) увеличивает гибкость работы, что позволяет реализовать стратегию кастомизации.

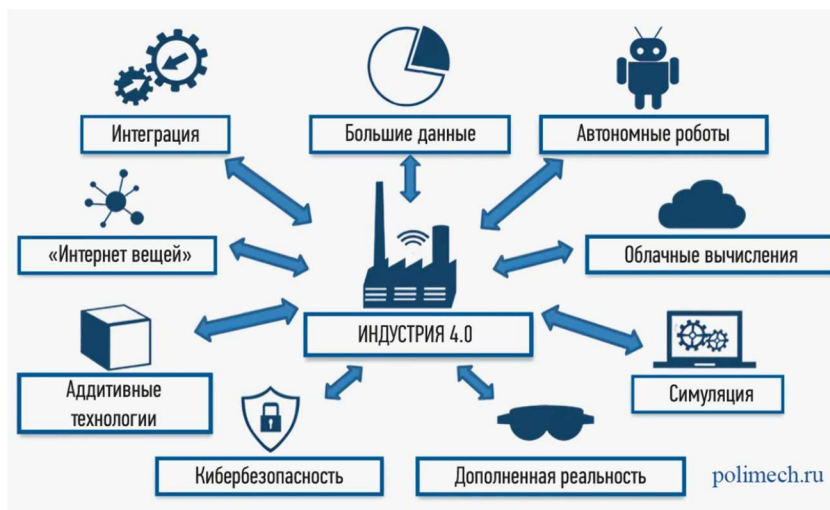


Рисунок 1 – Технологии Индустрии 4.0

3D-сканирование может рассматриваться в качестве сопутствующей технологии в идеологии Индустрии 4.0 как для аддитивных технологий, так и для симуляции. С его помощью специалисты могут проводить виртуальные инспекции и анализировать объекты на расстоянии, что высоко ценится в отраслях, где часто необходимо осуществлять дальние командировки для технического осмотра и фиксации параметров изделий. Такие возможности значительно увеличивают эффективность команд при распределенном проектировании, сокращают время на передвижения и уменьшают затраты на поездки. Сотрудники могут легко взаимодействовать с объектами и пространствами, даже находясь на больших расстояниях, что способствует улучшению общей коммуникации, уменьшению временных задержек и повышению качества работы в сферах машино-приборостроения и судостроения. Метод позволяет создавать точные трехмерные модели объектов, которые могут быть легко переданы через интернет. Этот метод обладает рядом преимуществ:

1. **Эффективность.** 3D-сканирование позволяет быстро создавать точные копии объектов без необходимости их физической передачи.
2. **Экономия времени и ресурсов.** Вместо отправки физического объекта, можно отправить его 3D-модель, что экономит время и средства на доставке.
3. **Точность данных.** 3D-сканирование обеспечивает высокую степень точности и детализации, что важно при передаче объектов со сложной геометрией.

В современном мире технологический прогресс неизбежно влияет на развитие производства, требуя от специалистов новых знаний и навыков. Инженер, обладающий опытом работы с программами для создания трёхмерных моделей, может легко освоить технику 3D-сканирования без длительной подготовки. Это открывает перед ним новые перспективы в области проектирования и создания инновационных продуктов. Большинство предприятий имеет возможность приобрести необходимое оборудование для 3D-сканирования и обеспечить специализированные курсы повышения квалификации для своего сотрудника. Этот шаг не только способствует повышению профессионального уровня персонала, но и позволяет компании эффективно адаптироваться к изменяющимся требованиям рынка.

В промышленности 3D-сканирование может быть использовано для передачи прототипов продуктов, демонстрации образцов товаров, создания виртуальных туров по

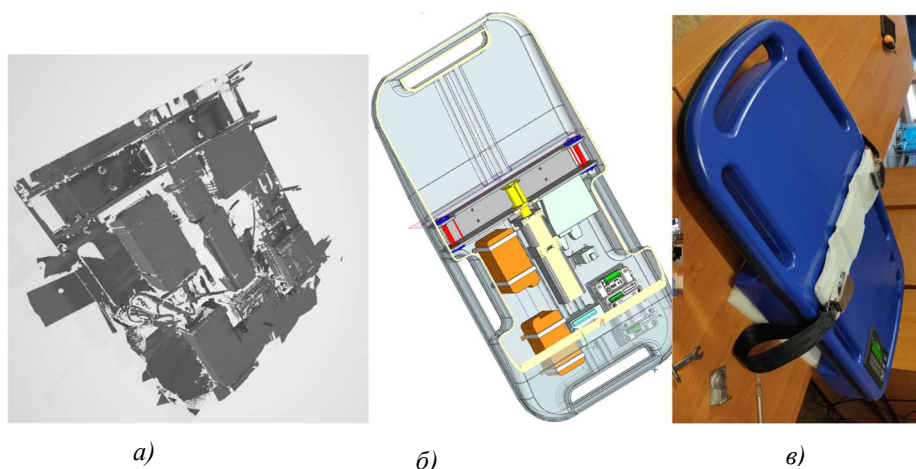
производственным помещениям и многого другого. Это особенно актуально в условиях дистанционной работы, когда команды находятся в разных географических точках.

## 2. Практические примеры использования 3D сканирования при распределенном проектировании

Лаборатория Севастопольского государственного университета, специализирующаяся на исследованиях экспериментальных систем жизнеобеспечения, разработала инновационный прототип, который привлек внимание производителя медицинской продукции. Предприятие предложило лаборатории заключить хоздоговор на НИОКР, при условии создания эргономичного и эстетичного корпуса устройства. Для решения этой задачи требовалась помощь опытного промышленного дизайнера, отсутствующего в штате сотрудников лаборатории.

Столкнувшись с этой сложностью, а также с необходимостью выполнения разработки в короткие сроки, лаборатория приняла решение о привлечении внешнего специалиста из другого города. Для его эффективной работы требовалось создание цифрового двойника механизмов и электронных компонентов устройства, который был создан в результате 3D-сканирования. Так, по полученному облаку точек и CAD-моделям стандартных компонентов, инженером промышленного дизайна был выполнен корпус, по размерам внутреннего наполнения устройства в соответствии с требованиями эргономики и технической эстетики, рабочий прототип которого был изготовлен в лаборатории с использованием аддитивных технологий (рисунок 2).

Этот инновационный подход, основанный на совмещении передовых технологий 3D-сканирования, компьютерного моделирования и 3D-печати не только позволил лаборатории быстро решить проблему отсутствия дизайнера, но и значительно ускорил процесс разработки и передачи продукта заказчику в соответствии с его техническим заданием.



**Рисунок 2 – Этапы создания медицинского изделия (сердечно-легочный реаниматор):**  
 а) скан внутренней части аппарата; б) CAD модель корпуса; в) готовый прототип изделия

В качестве второго примера можно привести кейс организации, специализирующейся на ремонте яхт, которая столкнулась с проблемой дефицита определенных деталей на рынке. После анализа потребностей рынка в подобных деталях компанией было принято решение о заказе прессформы для поврежденного резинового элемента. 3D-сканирование детали позволило создать фасетную модель, в которой был устранен шов, возникший от склейки треснувшего материала при его ремонте и после постобработки получить её точную CAD-модель (рисунок 3).

С использованием полученной цифровой копии была разработана прессформа на специализированном инструментальном предприятии. Такой подход не только позволил организации решить проблему дефицита деталей, но и помог оптимизировать процесс восстановления и ремонта яхт, без необходимости географической привязки между различными организациями.

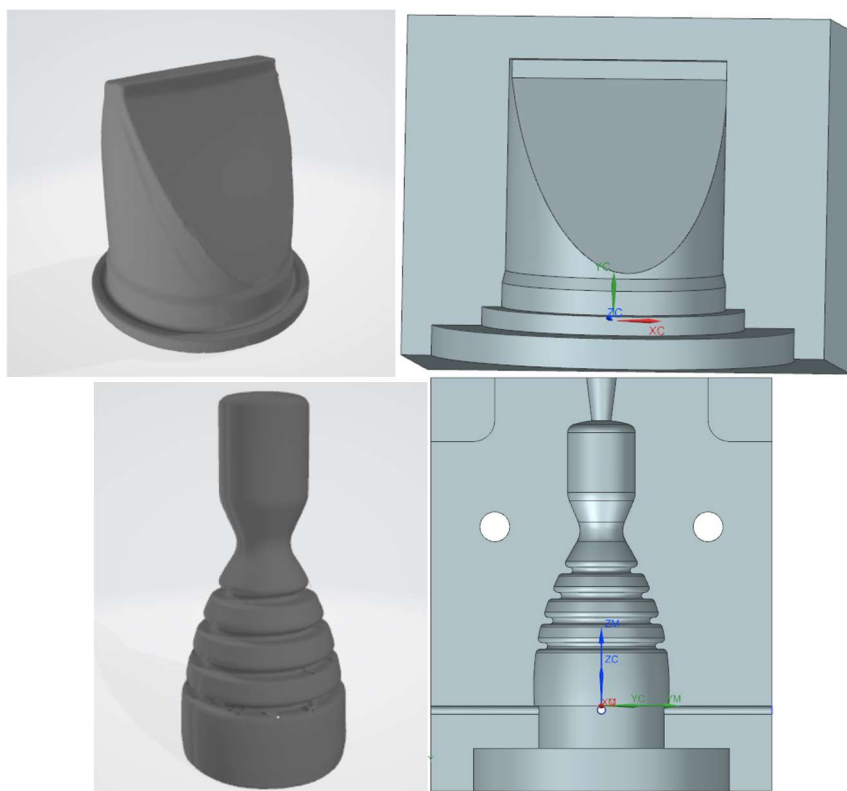


Рисунок 3 – Модели деталей яхт

### Заключение

Применение технологии 3D-сканирования в производстве открывает новые горизонты для компаний. Благодаря этой инновации предприятия могут дистанционно обращаться к специалистам в области дизайна, инженерии и других смежных областей, что значительно расширяет их потенциал. Возможность консультироваться с экспертами удаленно позволяет компаниям оперативно решать сложные технические задачи и улучшать качество своей продукции.

В условиях дистанционной работы использование 3D-сканирования представляет собой важное средство обмена информацией и предметами между удалёнными сотрудниками. Его преимущества включают эффективность, экономию времени и ресурсов, а также высокую точность.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рубанова К.А. Стратегии применения обратного инжиниринга в условиях цифровой трансформации экономики // Human Progress. 2022. Том 9, Вып. 1. С. 13. URL: [http://progresshuman.com/images/2023/Tom9\\_1/Rubanova.pdf](http://progresshuman.com/images/2023/Tom9_1/Rubanova.pdf). DOI 10.34709/IM.191.13. EDN AKEOLL.
2. Susan Lund, DC Anu Madgavkar, James Manyika, Sven Smit, Kweilin Ellingrud, Mary Meaney, Olivia Robinson The future of work after COVID-19 // McKinsey Global Institute February 2021 mgi\_the future of work after covid-19\_report\_feb 2021.pdf (mckinsey.de).
3. Галдин Д. Н. Перепроектирование сложнопрофильных корпусных деталей с применением современных систем геометрического моделирования // А.В. Иванов, О.Б. Тверье // Труды НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко. – 2019. – №35. – С. 173-187.
4. Селищев Д. Н. Автоматизация проектирования на основе реверс-инжиниринга // Сергеев А.И // ШАГ В НАУКУ. – 2019. – №2. – С. 62-64.
5. Агаева Т.А. Применение технологии трехмерного сканирования в области приборостроения // Е. В. Ткачева, А. Д. Шевяков, О. В. Кузнецова // Альманах научных работ молодых ученых университета ИТМО. – 2017. – С. 7-10.
6. Муклецов А. Метод метрологического контроля деталей, изготовленных по аддитивной технологии, с использованием 3d-сканирования // А. М. Золотов, Л. О. Федосова // Мир компьютерных технологий. – 2021. – С. 22-25.
7. Тараховский А. Ю. Трехмерное моделирование объекта на основе данных лазерного 3d сканирования // АПВМ. – 2023. – №14. – С. 16-19.
8. Чернов Р. С. Применение методов реверс-инжиниринга для решения производственных задач в современных реалиях // К. А. Мишкина, Ю. О. Стрелянная // МАиР. – 2022. – №10. – С. 48-51.

9. Вашкарин А. Д. Реализация узла крепления электродвигателя спортивного карта класса kf2 // Е.М. Генсон // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2023. – №1. – С. 5-12.
10. Винниченко А. В. Применимость модели обратного инжиниринга для задач унификации в процессах системного проектирования машиностроительных предприятий // С. А. Назаревич // SCIENCE AND EDUCATION: PROBLEMS AND INNOVATIONS. – 2020. – С. 34-39.

**Рощупкин Станислав Иванович**

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный  
Университет», г. Севастополь  
Кандидат технических наук, доцент  
Заведующий кафедрой «Приборостроение и транспорт»  
299053  
+7 978 70 40395  
E-mail: siroshchupkin@sevsu.ru

**Солнцева Дарья Сергеевна**

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный  
Университет», г. Севастополь  
Ассистент кафедры «Цифровое проектирование»  
299053  
+7 978 90 23 121  
E-mail: dssolntseva@sevsu.ru

S.I. ROSHCHUPKIN, D.S. SOLNTSEVA

## THE ROLE AND PLACE OF 3D SCANNING IN DISTRIBUTED DESIGN TECHNOLOGIES

**Abstract.** *When working remotely, there is often a need for effective exchange of information and items between remote employees. This article discusses the possibility of using 3D scanning as an innovative method for solving engineering problems, allowing for the process of data exchange in a distributed design environment.*

**Keywords:** *technology, import substitution, industry 4.0 mechanical engineering, instrumentation reverse engineering, shipbuilding, modeling, 3D scanning, additive technologies.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Rubanova K.A. Strategii primeneniya obratnogo inzhiniringa v usloviyah cifrovoj transformacii ekonomiki // Human Progress. 2022. Tom 9, Vyp. 1. S. 13. URL: [http://progresshuman.com/images/2023/Tom9\\_1/Rubanova.pdf](http://progresshuman.com/images/2023/Tom9_1/Rubanova.pdf). DOI 10.34709/IM.191.13. EDN AKEOLL.
2. Susan Lund, DC Anu Madgavkar, James Manyika, Sven Smit, Kweilin Ellingrud, Mary Meaney, Olivia Robinson The future of work after COVID-19 // McKinsey Global Institute February 2021 mgi\_the future of work after covid-19\_report\_feb 2021.pdf (mckinsey.de)
3. Galdin D. N. Pereproektirovanie slozhnoprofilnykh korpusnykh detalej s primeneniem sovremennykh sistem geometricheskogo modelirovaniya // A.V. Ivanov, O.B. Tvere // Trudy NPO Energomash imeni akademika V.P. Glushko. – 2019. – №35. – S. 173-187.
4. Selishchev D. N. Avtomatizatsiya proektirovaniya na osnove revers-inzhiniringa // Sergeev A.I // SHAG V NAUKU. – 2019. – №2. – S. 62-64.
5. Agaeva T.A. Primenenie tekhnologii trekhmernogo skanirovaniya v oblasti priborostroeniya // E. V. Tkacheva, A. D. Shevyakov, O. V. Kuznecova // Almanah nauchnykh rabot molodykh uchenykh universiteta ITMO. – 2017. – S. 7-10.
6. Muklecov A. Metod metrologicheskogo kontrolya detalej, izgotovlennykh po additivnoj tekhnologii, s ispolzovaniem 3d-skanirovaniya // A. M. Zolotov, L. O. Fedosova // Mir kompyuternykh tekhnologij. – 2021. – S. 22-25.
7. Tarahovskij A. YU. Trekhmernoe modelirovanie ob"ekta na osnove dannykh lazernogo 3d skanirovaniya // APvM. – 2023. – №14. – S. 16-19.
8. CHernov R. S. Primenenie metodov revers-inzhiniringa dlya resheniya proizvodstvennykh zadach v sovremennykh realiayah // K. A. Mishkina, YU. O. Strelyannaya // MAiR. – 2022. – №10. – S. 48-51.
9. Vashkarin A. D. Realizatsiya uzla krepleniya elektrodvigatelya sportivnogo karta klassa kf2 // E.M. Genson // Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya. – 2023. – №1. – S. 5-12.
10. Vinnichenko A. V. Primenimost modeli obratnogo inzhiniringa dlya zadach unifikacii v processah sistemnogo proektirovaniya mashinostroitelnykh predpriyatij // S. A. Nazarevich // SCIENCE AND EDUCATION: PROBLEMS AND INNOVATIONS. – 2020. – S. 34-39.

**Roshchupkin Stanislav Ivanovich**

Sevastopol State University, Sevastopol  
Ph.D, Associate Professor,  
Head of department «Instrumentation and Transport»  
299053  
+7 978 70 40395  
E-mail: siroshchupkin@sevsu.ru

**Solntseva Daria Sergeevna**

Sevastopol State University, Sevastopol  
Assistant of department «Digital Design»  
299053  
+7 978 90 23 121  
E-mail: dssolntseva@sevsu.ru

Адрес издателя:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»  
302026, Орловская область, г. Орёл, ул. Комсомольская, 95  
Тел. (4862) 75–13–18  
<http://oreluniver.ru>  
E–mail: [info@oreluniver.ru](mailto:info@oreluniver.ru)

Адрес редакции:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»  
302030, Орловская область, г. Орёл, ул. Московская, 34  
+7 (905) 169 88 99

<https://oreluniver.ru/science/journal/fipptt>  
E–mail: [radsu@rambler.ru](mailto:radsu@rambler.ru)

Материалы статей печатаются в авторской редакции

Право использования произведений предоставлено авторами на основании  
п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации

Технический редактор Тюхта А.В.  
Компьютерная верстка Тюхта А.В.

Подписано в печать 23.32.2024 г.  
Дата выхода в свет 1: .32.2024 г.  
Формат 70x108/16. Усл. печ. л. 12,4375  
Цена свободная. Тираж 1000 экз.  
Заказ № 1; 3

Отпечатано с готового оригинал–макета  
на полиграфической базе ОГУ имени И.С. Тургенева  
302026, Орловская область, г. Орёл, ул. Комсомольская, д. 95