

ISSN 2073-7408

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

5 (373) 2025

Редколлегия

Главный редактор

Радченко С.Ю. д-р техн. наук, проф.

Заместители главного редактора:

Барсуков Г.В. д-р техн. наук, проф.

Гордон В.А. д-р техн. наук, проф.

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

Поляков Р.Н. д-р техн. наук, проф.

Шоркин В.С. д-р физ.-мат. наук, проф.

Члены редколлегии:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Ответственный редактор:

Тюхта А.В. канд. техн. наук

Адрес редакции

302030, Орловская обл., г. Орёл, ул.

Московская, 34

+7 (905) 169 88 99

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

E-mail: radsu@rambler.ru

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

Подписной индекс 29504

по объединенному каталогу

«Пресса России»

на сайтах www.pressa-rf.ru и www.aks.ru

© ОГУ имени И.С. Тургенева, 2025

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

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

Содержание

Машиностроительные технологии и оборудование

Денисова Я.В., Габдрахманова К.Р. Разработка и создание импортозамещающей промышленности для авиационной промышленности	3
Шепелев А.Е., Солохин С.А., Шилов И.В., Ериков М.Н., Богданов А.В. Лазерная обработка конструкционных материалов импульсами сложной временной формы. Барсуков Г.В., Кожус О.Г., Журавлева Т.А., Баранов Ю.Н., Власов В.В., Прасолов Е.А. Моделирование условий раскрываемости частиц медного шлака при ударе для применения в гидроабразивном резании.....	14
Коряжкин А.А., Крылов И.В., Дружков С.С. Применение инструмента из режущей керамики в процессах фрезерной обработки деталей ГТД.....	24
Коряжкин А.А., Крылов И.В., Дружков С.С. Применение инструмента из режущей керамики в процессах фрезерной обработки деталей ГТД.....	33

Машиноведение и мехатроника

Нечаев А.А., Поляков Р.Н. Обзор методов обработки изображений для детектирования объектов с помощью искусственных нейронных сетей. Часть 1.....	39
Панкова К.В., Маслов А.И., Лизунов А.А. Анализ функционирования и модель испытаний крупногабаритной плотнительной манжеты в составе летательного аппарата	60
Труфанов Ф.А., Поляков Р.Н. Моделирование механизма углового перемещения в составе экзоскелета	67
Неуен Тхай Ха, Казаков Ю.Н., Шутин Д.В., Савин Л.А. Динамические характеристики конических-цилиндрических подшипников скольжения.....	74
Горин А.В., Родичев А.В., Яковленко О.В., Васильев К.В. Концепция мехатронного подшипника скольжения с механизмом адаптации к режимам трения.....	84
Кюргашкин И.А., Повадьвер В.Д., Засорин Е.М., Коломиец Е.В., Комаров А.Г. Разработка роботизированного модуля пипетирования.....	89

Приборы, биотехнические системы и технологии

Курзаков А.С. Особенности образования несущей способности адаптивного газостатического подшипника для прецизионных измерительных систем	99
Ефремова Е.С., Солдаткин В.В., Солдаткин В.М., Козловский Р.В., Солдаткин В.С. Динамические характеристики и погрешности каналов информационно-измерительной системы воздушных сигналов с фюзеляжным приемником параметров набегающего потока.....	110
Васильева И.Е., Сайбель А.Г. Об обеспечении оптимального выбора и создания стабильной световой картины посредством светодиодных источников света	118
Шуплецов В.В. Обзор технических реализаций и алгоритмов обработки результатов гиперспектральных измерений при изучении ишемических повреждений	126

Контроль, диагностика, испытания и управление качеством

Кукушкин К.В., Мартынец Е.Р. Математическая модель оценки качества деятельности инженерного центра	135
Бондарева Л.А., Суханова М.В., Шуплецов В.В. Использование спектр-контрастной визуализации для оценки изменения состояния шероховатой поверхности листьев растительных организмов	142

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

Долголонян А.В., Матвеенко В.Т., Клименко А.Г. Исследование гибких комбинированных микрогазотурбинных установок с промежуточным подогревом и использованием местных климатических ресурсов холода на частичных нагрузках.....	149
Голенков В.А., Радченко С.Ю., Дорохов Д.О. Исследование рекристаллизационного отжига для лент из легированного сплава системы меди-никель-алюминий.....	166
Низмеев А.А., Дорохов Д.О. Применение радиально-обжимных бойков для концевой заделки тросов методом опрессовки.....	174
Георгиевская Е.В., Георгиевский Р.Н., Георгиевский Н.В., Гришин И.М. к вопросу on-line мониторинга состояния опорных узлов гидроагрегата	180
Неменко А.В., Никитин М.М., Мешков В.В. Прогнозные оценки температуры при сверлении отверстий в изделиях из полимерных материалов	188
Гайнгулина Я.Н., Калинин М.И., Сопин П.К., Мальков С.Ю. Синтез технологических приспособлений для серийного производства спинальных имплантируемых изделий	194
Канатников Н.В., Радченко С.Ю. Метод оптимизации процесса обработки резанием зубчатых колес стандартного и специального профиля	200
Долголонян А.В., Матвеенко В.Т., Клименко А.Г. Термодинамические характеристики гибридных микрогазотурбинных установок с интегрированным фокусирующими солнечным коллектором в условиях севера	207
Пахалюк А.В., Стадник Т.В. Краткий анализ методов полирования длинномерных цилиндрических алюминиевых заготовок	223
Годжаев З.А., Шеховцов В.В., Потапов П.В., Клементьев Е.В., Долотов А.А., Евсеева А.А. Экспериментальные исследования уровня шума в салоне специального микроавтобуса	229

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)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Responsible editor:

Tyukhta A.V. Candidate Sc. Tech.

Address

302030, Oryol region, Oryol, st.

Moskovskaya, 34

+7 (905) 169 88 99

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

E-mail: radsu@rambler.ru

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

Index on the catalogue of the

«Pressa Rossii» 29504

on the websites www.pressa-rf.ru

and www.aks.ru

© Orel State University, 2025

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

Denisova Y.V., Gabdrakhmanova K.R. Development and creation of import-substituting products for the aviation industry	3
Shepelev A.E., Solokhin S.A., Shilov I.V., Ershkov M.N., Bogdanov A.V. Laser processing of structural materials with pulses of complex time shape	14
Barsukov G.V., Kozhus O.G., Zhuravleva T.A., Baranov Yu.N., Vlasov V.V., Prasolov E.A. Modeling the conditions of copper slag particle opening under impact for use in water-jet cutting.....	24
Koryazhkin A.A., Krylov I.V., Druzhkov S.S. The use of cutting ceramic tools in the milling of GTE parts.....	33

Machine Science and Mechatronics

Nechaev A.A., Polyakov R.N. Review of image processing methods for object detection using artificial neural networks. Part 1	39
Pankova K.V., Maslov A.I., Lizunov A.A. Analysis of the functioning and test model of a large-sized sealing sleeve in an aircraft	60
Trufanov F.A., Polyakov R.N. Modeling of the angular displacement mechanism in an exoskeleton.....	67
Nguyen Thai Ha, Y.N. Kazakov, L.A. Savin Dynamic characteristics of conical-cylindrical plain bearings.....	74
Gorin A.V., Rodichev A.Yu., Yakovlenko O.V., Vasilev K.V. Concept of mechatronic sliding bearing with an adaptation mechanism to friction modes	84
Kyurkchuk I.A., Povadyr V.D., Zasorin E.M., Kolomiets E.V., Komarov A.G. Development of a robotic pipetting module.....	89

Devices, biotechnical systems and technologies

Kurzakov A.S. Features of load-carrying capacity formation of an adaptive gas-static bearing for precision measurement systems.....	99
Efremova E.S., Soldatkin V.V., Soldatkin V.M., Kozlovsky R.V., Soldatkin V.S. Dynamic characteristics and channel errors of the information and measurement system of air signals with a fuselage receiver of incoming flow parameters	110
Vasilieva I.E., Saibel A.G. On ensuring optimal selection and creation of a stable light painting by means of led light sources	118
Shupletsov V.V. A review of technical implementations and data processing algorithms for hyperspectral measurements in the study of ischemic injuries	126

Monitoring, Diagnostics, Testing and Quality Management

Kukushkin K.V., Martynets E.R. Mathematical model for assessing the quality of an engineering centers performance	135
Bondareva L.A., Sukhanova M.V., Shupletsov V.V. The use of speckle contrast imaging to assess changes in the state of the rough surface of leaves of plant organisms	142

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

Dologlonyan A.V., Matviienko V.T., Klimenko A.G. Study of flexible combined micro gas turbine plants with intermediate heating and use of local climatic cold resources at partial loads	149
Golenkov V.A., Radchenko S.Y., Dorohov D.O. Research of recrystallization annealing for bands of alloyed aluminium system copper – nickel – aluminium	166
Nizmeyev A.A., Dorohov D.O. The using of radial swaging dies for cable sealing by crimping	174
Georgievskaya E.V., Georgievsky R.N., Georgievsky N.V., Grishin I.M. About online health monitoring of hydraulic unit supports	180
Nemenko A.V., Nikitin M.M., Meshkov V.V. Predictive estimates of temperature when drilling holes in polymeric products	188
Gainullina Ya.N., Kalinin M.I., Sopin P.K., Malkov S.Y. Synthesis of technological devices for mass production of spinal implantable products	194
Kanatnikov N.V., Radchenko S.Y. A method for optimizing the machining process by cutting gears of standard and special profiles	200
Dologlonyan A.V., Matveenko V.T., Klimenko A.G. Thermodynamic characteristics of hybrid micro gas turbine plants with an integrated focusing solar collector in northern conditions	207
Pakhaliiuk A.V., Stadnik T.V. A brief analysis of polishing methods for long cylindrical aluminum blanks	223
Godzhaev Z.A., Shekhovtsov V.V., Potapov P.V., Klementiev E.V., Dolotov A.A., Evseeva A.V. Experimental study of internal noise level of ambulance van	229

МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ

УДК 629.7.027

DOI: 10.33979/2073-7408-2025-373-5-3-13

ДЕНИСОВА Я.В., ГАБДРАХМАНОВА К.Р.

РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ИМПОРТОЗАМЕЩАЮЩЕЙ ПРОДУКЦИИ ДЛЯ АВИАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Аннотация. Статья рассматривает процесс разработки и создания импортозамещающей продукции для авиационной промышленности России. В условиях экономических санкций и политической нестабильности, отрасль сталкивается с необходимостью снижения зависимости от зарубежных поставок. В статье анализируются ключевые проблемы, такие как недостаток инвестиций, технологические вызовы и сложности сертификации, и предлагаются пути их решения через государственную поддержку, международное сотрудничество и развитие инфраструктуры. Особое внимание уделяется успешным примерам, включая проект авиадвигателя ПД-14 для самолета МС-21. В статье представлен процесс производства воздушного судна с использованием методологии IDEF0. Обозначены возможности детально описать все функции, потоки данных и материалов, а также механизмы выполнения при производстве АТ. Подчеркивается важность научных исследований и подготовки высококвалифицированных специалистов для обеспечения технологического суверенитета. Статья будет полезна специалистам в области авиастроения и всем, кто интересуется вопросами импортозамещения в высокотехнологичных отраслях.

Ключевые слова: импортозамещение, авиационная промышленность, авиационная техника, производство, самолет, прогнозы развития.

Введение

Авиационная промышленность является одной из ключевых отраслей экономики, обеспечивающей не только транспортную безопасность, но и технологический суверенитет государства. В современных условиях экономических санкций и политической нестабильности, вопрос разработки и создания импортозамещающей продукции становится особенно актуальным.

Россия, как один из лидеров в области авиастроения, сталкивается с необходимостью снижения зависимости от зарубежных поставок и развития собственных производственных мощностей. Это требует комплексного подхода, включающего инновационные технологии, государственную поддержку и международное сотрудничество.

Основная часть

Анализ современного состояния импортозамещения в авиационной промышленности России

Импортозамещение в авиационной промышленности России является стратегически важным направлением, направленным на уменьшение зависимости от зарубежных поставок и укрепление технологического суверенитета страны. В данной статье рассматриваются ключевые аспекты современного состояния этого процесса.

Испытания гражданских самолётов российского производства

Одним из значимых достижений в области импортозамещения является проведение испытаний новых моделей гражданских самолётов:

1. Самолёт Superjet: импортозамещённая версия самолёта Superjet приступила к лётной части сертификационных испытаний. Это свидетельствует о значительных успехах в замене иностранных компонентов на отечественные аналоги.

2. Самолёт МС-21: полностью изготовлен первый опытный образец самолёта МС-21 с отечественным двигателем ПД-14. Это важный шаг в развитии среднемагистральной авиации и конкурентоспособности на мировом рынке. Самолёт МС-21, оснащённый российским двигателем, должен стать основным конкурентом зарубежных моделей в своём классе.

3. Самолёт Ил-114: находится в продвинутой стадии испытаний, выполнено более 20 % сертификационных полётов. Это показывает активное продвижение в тестировании и доработке данной модели.

4. Самолёт Ту-214: уже выпускается, что подтверждает возможность налаженного производства и эксплуатации без значительных задержек [1].

Планы по импортозамещению самолёта Superjet-100

В рамках программы импортозамещения самолёта Superjet-100 запланированы следующие этапы:

– в 2025 году: изготовление опытных образцов компонентов, доработка самолётов, проведение предварительных испытаний и уточнение документации;

– серийное производство импортозамещённых самолётов Superjet-100 ожидается не ранее 2026 года. Это позволяет говорить о долгосрочной перспективе и тщательной подготовке к массовому выпуску.

Разработка двигателя ВК-800

Важным направлением является работа над двигателем ВК-800:

- сертификация двигателя запланирована на 2025 год;
- начало серийного выпуска ожидается в 2026 году.

Данные инициативы отражают решимость российского авиапрома достичь технологической независимости в сфере двигателестроения и укрепить свои позиции на мировом авиационном рынке.

Значительный акцент делается на создании силовых установок для дальнемагистральной авиации. Реализация этих проектов обеспечит России возможность осуществлять полный производственный цикл – от разработки до обслуживания воздушных судов, что существенно повысит её влияние в мировой авиационной отрасли.

Согласно перспективным планам развития авиапромышленности до 2030 года (таблица 1), ожидается рост объема перевозок на 16 % при увеличении доли отечественных самолетов до 81 %. Авиакомпании России к 2030 году потребуется около 1000 самолетов и 764 вертолета. Такой рост обусловлен увеличением пассажиропотока и необходимостью обновления парка за счет замены устаревших иностранных воздушных судов.

В рамках программы импортозамещения к 2024 году планировалось наладить серийное производство модифицированного регионального лайнера SSJ New (дальность полета базовой версии – 4,4 тыс. км, пассажировместимость – 98 человек). Параллельно стартовал выпуск среднемагистрального самолета МС-21 (вмещает от 181 до 211 пассажиров) в российской комплектации.

Однако по умеренным оценкам, производство 20 самолетов SSJ New в 2024 году не гарантировано, поэтому регулярные поставки для обновления парка российских перевозчиков ожидаются с 2025 года.

На сегодняшний день единственным российским конкурентом Boeing и Airbus выступает среднемагистральный лайнер Ту-214, рассчитанный на перевозку от 150 до 215 пассажиров.

Подробные прогнозные показатели развития отечественного авиастроения по годам представлены в таблице 1 [2].

Прогноз доли SSJ New, МС-21 и ТУ-214 в соответствующих группах воздушных судов представлен на рисунке 1 [3].

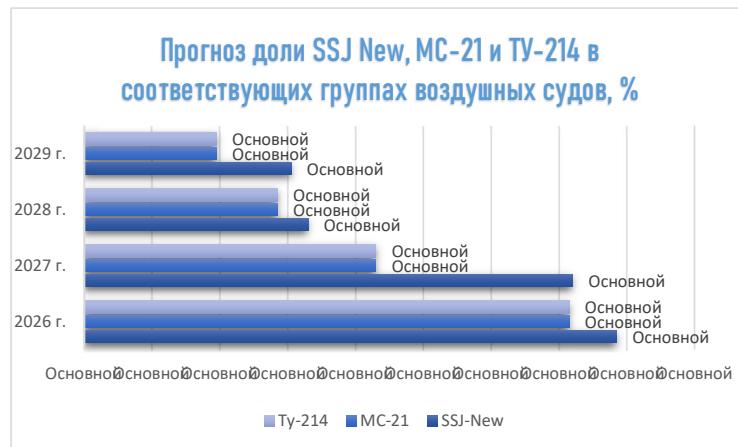


Рисунок 1 – Прогноз доли SSJ New, МС-21 и ТУ-214 в соответствующих группах воздушных судов [3]

Таблица 1 – Прогнозные показатели отечественного производства авиационной техники по годам [1]

Тип ВС	Вместимость, чел.	2022 г	2023 г	2024 г	2025 г	2026 г	2027 г	2028 г	2029 г	2030 г	Всего, единиц
SSJ-NEW	98-103	–	2	20	20	20	20	20	20	20	142
MC-21-310	181-211	–	–	6	12	22	36	50	72	72	270
Ил-114-300	64-68	–	–	2	8	12	12	12	12	12	70
Ту-214	150-215	–	3	7	10	10	10	10	10	10	70
Ил-96-300	237-300	–	–	–	2	2	2	2	2	2	12
ПВРС-44 «Ладога»	44	–	–	–	15	25	25	25	25	25	140
Л-410	15-19	18*	20	20	20	20	20	20	20	20	178
«Байкал» (ЛМС-901)	9	–	–	14	15	25	25	25	25	25	154
ИТОГО:		18*	25	69	102	136	150	164	186	186	1036*

Примечание – Из них 4 воздушных судна Л-410 поступило в I квартале 2022 г.

В настоящее время рынок сталкивается с острой проблемой – невозможностью приобретения западной специализированной электроники для военной авиационной и космической техники, которую не способны полноценно заменить аналоги из Китая и Индии.

Система датчиков играет критически важную роль в обеспечении безопасного и эффективного управления воздушным судном. Для принятия решений пилоту необходима постоянная информация о различных параметрах полета и состоянии бортового оборудования. Эту информацию собирают многочисленные датчики, которые в реальном времени передают данные бортовым компьютерам для их обработки и анализа.

Рынок датчиков представлен широким ассортиментом устройств, включая:

- температурные датчики;
- датчики давления;
- датчики силы;
- датчики скорости;
- датчики крутящего момента;
- акселерометры;
- датчики расхода;
- датчики положения;
- датчики приближения;
- GPS-датчики;
- гироскопы;
- радарные датчики;
- датчики обнаружения дыма;
- датчики угла атаки;
- датчики уровня;
- датчики вибрации;
- датчики воздушной скорости и высоты.

По прогнозам экспертов, наибольшую долю рынка в обозримом будущем займут датчики положения, давления и температуры. Это обусловлено их активным применением в системах управления полетом и кабиной. Данные устройства интегрируются в различные системы воздушного судна: кабину, воздуховоды, тормозную систему, турбины, гидравлические контуры и другие критически важные узлы [4].

Импортозамещение самолёта МС-21

По информации на ноябрь 2023 года, авиалайнер МС-21 был импортозамещён на 99 %. По данным на март 2025 года, Иркутский авиа завод собрал первый полностью импортозамещённый МС-21 с российским двигателем. Серийное производство самолётов МС-21 планируется начать в 2026 году.

В рамках импортозамещения в самолёте МС-21 определены 56 основных поставщиков деталей. Вот некоторые из них:

- 1) Обнинское научно-производственное предприятие «Технология» им. А. Г. Ромашина (входит в ГК «Ростех») – занимается изготовлением остекления кабины экипажа.
- 2) Авиационная корпорация «Рубин» в Балашихе – изготавливает колёса и часть тормозных систем для самолёта МС-21.
- 3) «Ярославский шинный завод авиа» («ЯШЗ – Авиа») – работает над производством шин для самолёта МС-21.
- 4) Минский завод гражданской авиации №407 – предприятие изготавливает подшипники.
- 5) Санкт-Петербургское производственное объединение «Техприбор» представило инновационное решение в виде испытательного стенда, предназначенного для проведения предварительных тестов и получения сертификационных документов на топливные системы воздушных судов.

6) Раменский приборостроительный завод (РПЗ), который входит в концерн «Радиоэлектронные технологии» госкорпорации «Ростех» – производит блоки навигации и посадки, а также системы предупреждения столкновения в воздухе.

7) ООО «Центр инженерных разработок «Парус». Компания занимается разработкой, интеграцией, испытанием, квалификацией и сертификацией авиационных систем, в том числе систем перемещения механизации крыла.

8) Казанское предприятие АО «КАПО-Композит» специализируется на производстве ключевых компонентов для российского среднемагистрального лайнера МС-21. В производственную линейку компании входят:

- элементы конструкции крыла (носовая и хвостовая части);
- системы механизации крыла (воздушные тормоза, интерцепторы, закрылки, элероны);
- элементы оперения (рули высоты и руль направления).

Компания обеспечивает изготовление важнейших узлов управления и стабилизации воздушного судна, которые отвечают за его маневренность и безопасность полета.

9) Авиазавод «Сокол» в Нижнем Новгороде – на предприятии монтируют системы приводов управления полётом и оборудование для кондиционирования воздуха, первый отечественный комплекс автоматической клёпки для изготовления деталей самолёта МС-21. Завершить монтаж планируется в ноябре 2025 года, после чего специалисты приступят к пусконаладочным работам и обучению персонала.

10) АО «ОДК-Пермские моторы» в Перми – изготавливает двигатели ПД-14. В конце 2020 года предприятие получило сертификат Росавиации на серийное изготовление ПД-14, который создавался в основном для российского лайнера МС-21.

11) АО «Уфимское агрегатное производственное объединение» (УАПО) холдинга «Технодинамика» – предприятие изготовило опытный образец аварийного синхронного генератора для системы электроснабжения авиалайнеров МС-21.

12) АО «Агрегат» в Самаре – производит агрегаты гидравлических систем и иллюминаторов.

13) АО «АэроКомпозит-Ульяновск» – предприятие специализируется на изготовлении центроплана, аварийно-спасательных трапов и пультов управления.

14) Центр специализации ОАК «Двери и люки» в Комсомольске-на-Амуре – специализируется на производстве дверей и люков гражданских авиалайнеров МС-21, SJ-100, Ил-114, Ту-214 [5].

Также в рамках импортозамещения в проекте МС-21 зарубежные композитные материалы были заменены на российские аналоги.

Степень импортозамещения лайнера МС-21 отражена на рисунке 2.

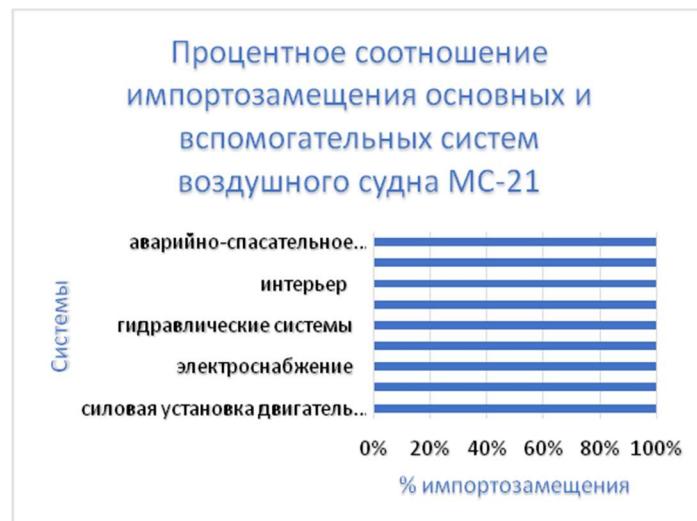


Рисунок 2 – Процентное соотношение импортозамещения основных и вспомогательных систем воздушного судна МС-21 [5]

Общий анализ по реализации импортозамещения по проекту МС-21:

- 13 ключевых систем и компонентов полностью локализованы;
- 56 поставщиков участвуют в производстве;
- все критические системы самолета имеют отечественные аналоги.

Под давлением санкций началась масштабная программа импортозамещения, в результате которой удалось заменить около 80 % иностранных компонентов, включая такие критически важные элементы, как авионика, системы управления, электроника, климатическое оборудование и, самое главное, двигатели.

Особое внимание в новой конфигурации самолёта уделено турбовентиляторному двигателю ПД-14 – первому за постсоветский период авиационному двигателю гражданского назначения, полностью разработанному и произведённому в России. Он стал ключевым элементом проекта, позволив перейти на полностью автономное производство.

Разработка ПД-14 велась Объединённой двигателестроительной корпорацией, входящей в состав «Ростеха», и была завершена в 2022 году. Этот двигатель соответствует международным стандартам по выбросам и шуму, а его внедрение обеспечивает России независимость от зарубежных производителей.

МС-21 представляет собой семейство среднемагистральных пассажирских авиалайнеров, предназначенных для перевозки от 132 до 211 пассажиров на расстояния до 6400 км. Самолёт проектировался как конкурент зарубежным моделям Airbus A320neo и Boeing 737 MAX. Его крейсерская скорость составляет около 870 км/ч.

Одной из инновационных особенностей МС-21 является использование композитных материалов в конструкции крыла, что позволяет снизить массу и повысить топливную эффективность.

29 апреля 2025 года состоялся первый полёт опытного образца воздушного судна МС-21, полностью оснащённого отечественными комплектующими. Этот полёт стал важным этапом в развитии российской гражданской авиации, поскольку ранее в конструкции МС-21 применялись многочисленные импортные узлы и агрегаты.

Испытательный полёт продолжался 75 минут, в течение которых самолёт достиг высоты 3000 метров и развил скорость до 580 км/ч. Эти испытания стали началом нового цикла заводских лётных проверок, необходимых перед сертификацией обновлённой модели.

Таким образом, на текущий момент МС-21 имеет степень импортозамещения 100 %, что позволяет говорить о полной технологической независимости самолета от иностранных комплектующих. С запуском полностью импортонезависимой версии МС-21 Россия делает шаг к формированию собственной высокотехнологичной промышленной базы, способной обеспечить гражданские авиакомпании техникой без участия иностранных поставщиков. Это особенно важно на фоне продолжающейся геополитической напряжённости, когда риски внешнего давления и перебоев в поставках остаются высокими.

Хотя на пути к полной технологической независимости ещё предстоит пройти значительный путь, нынешний этап в программе МС-21 рассматривается как серьёзное достижение российской авиационной отрасли. Он демонстрирует не только инженерный потенциал, но и политическую решимость обеспечить стратегическую автономию в ключевых отраслях экономики [5].

Проблемы, влияющие на развитие авиапрома

1. Проблема зависимости от импортных комплектующих. Одной из наиболее существенных проблем, с которыми сталкивается отечественная авиационная промышленность, является зависимость от поставок зарубежных комплектующих и технологий. В обстановке ужесточения санкций и введения ограничений на экспорт высокотехнологичной продукции, авиастроителям становится все сложнее получать необходимые компоненты. Это обстоятельство, несомненно, приводит к замедлению темпов разработки и производства новых образцов АТ и авиационных двигателей.

2. Инвестиционные и финансовые ограничения. В условиях экономической нестабильности и ограниченности бюджетных средств, привлечение капитала становится

сложной задачей. Недостаток инвестиций может привести к устареванию технологий и снижению конкурентоспособности продукции [6].

3. Технологические вызовы. Развитие новых технологий и материалов требует значительных научных и инженерных ресурсов. Внедрение композитных материалов, разработка новых двигателей и систем управления полётом требуют не только времени, но и высококвалифицированных специалистов. Недостаток таких кадров и ограниченные возможности для их подготовки создают дополнительные трудности.

4. Сертификационные испытания и бюрократические барьеры. Процесс сертификации новых моделей самолётов и двигателей занимает длительное время и требует значительных затрат.

Разработка комплексного подхода по обеспечению выпуска импортозамещающей продукции высокого качества в авиационной промышленности

1. Государственная поддержка и финансирование

Государственная поддержка играет ключевую роль в развитии авиационной промышленности. Для эффективной реализации политики импортозамещения требуется комплексный подход, включающий:

- масштабное финансирование научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР);
- кардинальную модернизацию производственных мощностей;
- создание системы подготовки и развития высококвалифицированных кадров.

Государственные программы поддержки, которые:

- обеспечивают необходимое финансирование импортозамещающих проектов;
 - способствуют снижению зависимости от иностранных поставок;
 - стимулируют разработку и внедрение отечественных технологических решений;
 - создают благоприятные условия для развития внутреннего производства.
- инвестиции в инфраструктуру: создание новых заводов, испытательных центров и модернизация существующих производственных мощностей позволяют повысить эффективность производства и качество продукции [7].

2. Международное сотрудничество и трансфер технологий

Несмотря на санкции, международное сотрудничество в области авиации продолжается. Россия активно ищет партнёров в странах Азии, Африки и Латинской Америки, что позволяет обмениваться технологиями и расширять рынки сбыта.

- технологические партнерства: сотрудничество с международными партнёрами позволяет внедрять передовые технологии и методы производства, что способствует повышению качества продукции;
- экспортные программы: развитие экспорта АТ и услуг способствует укреплению позиций на мировом рынке и получению обратной связи для улучшения продукции.

3. Разработка и внедрение новых технологий

Внедрение новых технологий и материалов требует значительных научных и инженерных. Эффективное использование ресурсов приобретает первостепенное значение в авиационной отрасли, где непрерывные инновации напрямую влияют на развитие ключевых направлений: совершенствование двигательных установок; создание современных систем управления воздушным судном; разработку прогрессивных композитных материалов.

- активная научная деятельность и проведение опытно-конструкторских работ выступают фундаментальной основой для: формирования технологических новшеств; повышения конкурентоспособности продукции; обеспечения технологического лидерства; укрепления позиций на мировом рынке. Финансирование научных проектов, сотрудничество с университетами и исследовательскими институтами способствуют развитию инновационных решений;

– подготовка кадров: развитие программ обучения и повышения квалификации специалистов, работающих в авиационной промышленности, позволяет поддерживать высокий уровень профессионализма и компетентности.

4. Сертификация и контроль качества

Процесс сертификации новых моделей самолётов и двигателей занимает длительное время и требует значительных затрат. Строгие нормы безопасности и бюрократические процедуры могут замедлять внедрение инноваций и увеличивать стоимость производства.

– стандарты и нормы: соблюдение международных стандартов и норм безопасности является обязательным условием для успешного выхода на мировой рынок;

– системы контроля качества: внедрение современных систем контроля качества на всех этапах производства позволяет минимизировать дефекты и обеспечивать соответствие продукции высоким стандартам [8].

5. Интеграция отечественных поставщиков

Одним из ключевых факторов успешного импортозамещения является развитие сети отечественных поставщиков комплектующих и материалов. Это позволяет снизить зависимость от зарубежных поставок и ускорить процесс разработки и производства.

Локализация производства: определение и поддержка ключевых поставщиков деталей и компонентов внутри страны. Например, в проекте самолёта МС-21 задействованы 56 основных поставщиков, что обеспечивает высокий уровень локализации производства.

Испытания и сертификация: проведение совместных испытаний и сертификационных процедур с поставщиками для обеспечения соответствия продукции требованиям и стандартам.

Разработка комплексного подхода по обеспечению выпуска импортозамещающей продукции высокого качества в авиационной промышленности требует скоординированных усилий государства, промышленности и научного сообщества. Государственная поддержка, международное сотрудничество, развитие технологий и строгий контроль качества являются ключевыми направлениями для обеспечения устойчивого роста и конкурентоспособности отрасли. Преодоление текущих вызовов позволит России укрепить свои позиции на мировом рынке авиационной техники и обеспечить технологический суверенитет [8].

В статье был рассмотрен процесс производства воздушного судна с использованием методологии IDEF0.

Общую организационную схему процесса производства воздушного судна можно представить в виде контекстной диаграммы, представленной на рисунке 3, с соответствующими интерфейсами.

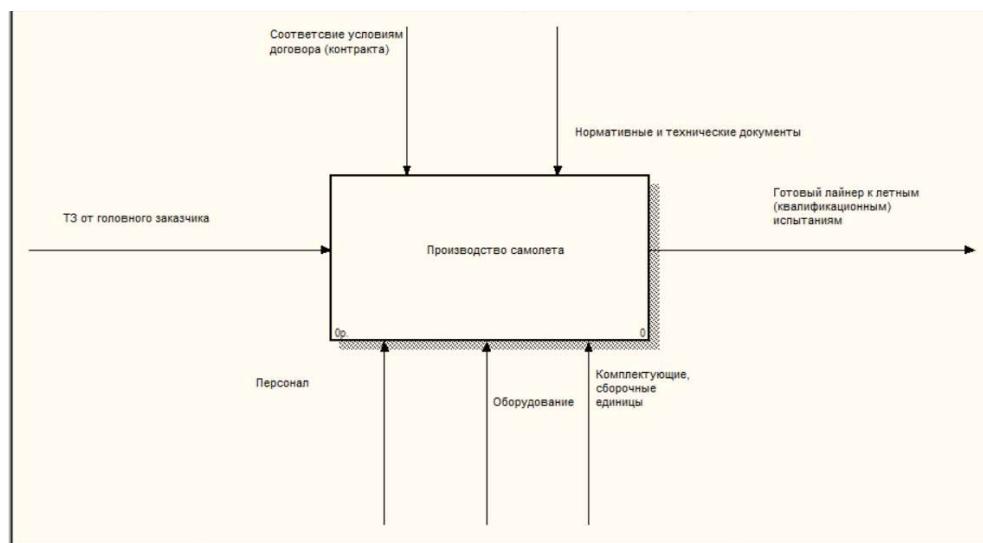


Рисунок 3 – Диаграмма общего представления производства воздушного судна

Для производства воздушного судна задействуются такие ресурсы как:

- ТЗ от головного заказчика;
- персонал;
- оборудование;
- комплектующие, сборочные единицы;
- соответствие условиям договора (контракта);
- нормативные и технические документы [9, 10].

Блок декомпозируется, если необходимо детально описать его работу. Декомпозиция блока, осуществляется разбиение его на несколько других представленных на рисунке 4.

Основной блок подразделяется на следующие процессы:

- исследование в обеспечении создания образца АТ;
- проектирование ВС;
- изготовление опытных образцов, испытания и доводка;
- подготовка и освоение производства;
- испытания и сертификация;
- серийное производство;
- эксплуатация;
- модификация образца АТ;
- утилизация.

Использование методологии IDEF0 позволило создать структурированный и наглядный алгоритм производства воздушного судна, который отражает все ключевые этапы и процессы. Программа IDEF0, являющаяся частью семейства методологий IDEF, предоставляет мощный инструмент для функционального моделирования, что делает возможным точное и лаконичное описание производственных систем.

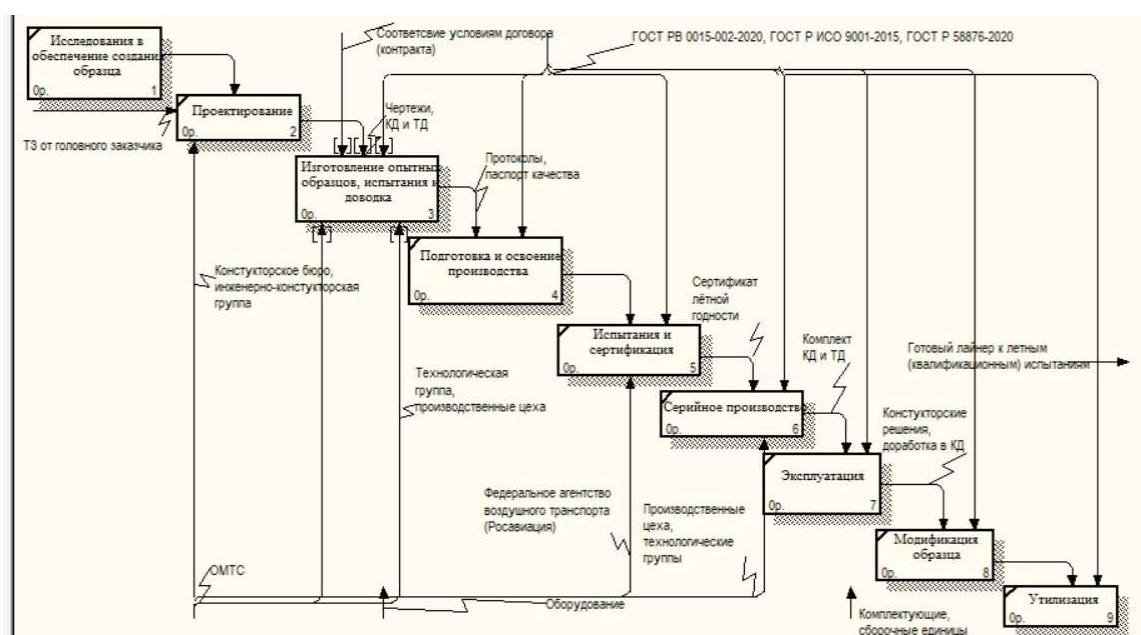


Рисунок 4 – Диаграмма декомпозиции функционального блока первого уровня

Основные этапы разработки алгоритма

1. Идентификация функций: на первом этапе были определены все основные функции, участвующие в процессе производства воздушного судна. Каждая функция была представлена в виде функционального блока, что позволило структурировать процесс и выделить ключевые этапы.

2. Определение потоков данных и материалов: с помощью интерфейсных дуг (стрелок) были обозначены потоки данных и материалов между различными функциями. Это обеспечило наглядность взаимодействия между различными элементами производства.

3. Входы, управления и выходы: для каждой функции были четко определены входы (необходимые условия и ресурсы), управления (правила и стандарты, регулирующие процесс) и выходы (результаты выполнения функции). Такой подход обеспечил полноту и точность описания модели создания ВС.

4. Механизмы выполнения: были указаны механизмы, обеспечивающие выполнение каждой функции, что позволило детализировать процесс и учесть все необходимые ресурсы и инструменты.

Применение программы IDEF0 для формирования алгоритма производства ВС обеспечило следующие преимущества:

1. Структурированность и наглядность: четкое визуальное представление всех этапов и процессов производства.
2. Точность и полнота описания: возможность детально описать все функции, потоки данных и материалов, а также механизмы выполнения.
3. Легкость взаимодействия и понимания: простота восприятия модели всеми участниками производственного процесса [11].

Таким образом, использование IDEF0 стало ключевым фактором в создании эффективного и структурированного алгоритма производства ВС, что способствует оптимизации и повышению качества производственных процессов в авиационной промышленности.

Заключение

Разработка и создание импортозамещающей продукции для авиационной промышленности России – это стратегически важная задача, направленная на обеспечение технологического суверенитета и снижение зависимости от зарубежных поставок в условиях экономических санкций и политической нестабильности. В ходе исследования были выявлены ключевые проблемы, с которыми сталкивается отрасль: недостаток инвестиций, технологические вызовы и сложности сертификации.

Для решения этих проблем предложены меры государственной поддержки, развитие международного сотрудничества и укрепление инфраструктуры. Особое внимание уделено успешным примерам импортозамещения по проекту МС-21.

Подчеркнута важность научных исследований и подготовки высококвалифицированных специалистов, которые являются основой для устойчивого развития и конкурентоспособности авиационной промышленности. Реализация предложенных мер позволит не только преодолеть текущие вызовы, но и заложить прочный фундамент для будущих инноваций и технологического прогресса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брагин Д.А. Оценка современного состояния импортозамещения в авиастроении // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2023. Том 13. № 10А. С. 82-90. DOI: 10.34670/AR.2023.56.34.014 (дата обращения: 21.04.2025).
2. Андреева Е.С. Актуализация вопросов импортозамещения и развития инноваций в современных условиях хозяйствования // Конкурентоспособность в глобально мире: экономика, наука, технологии. 2022. № 11. С. 10- 12.
3. Шманев, С. В. Развитие авиационной отрасли в России на фоне глобальных геополитических изменений / С. В. Шманев // Экономика, предпринимательство и право. – 2025. – Т. 15, № 7. – DOI 10.18334/errp.15.7.123235.
4. Дутов, А. В. «Большие вызовы» для авиации, авиастроения и развития авиационных технологий / А. В. Дутов, В. В. Клочков, С. М. Рождественская – М.: ФГУП «ГосНИИАС». – 2017. – 124 с.
5. Артющик В.Д., Гусаков А.Г., Тихонов А.И. Развитие авиационной промышленности Российской Федерации в условиях импортозамещения // Московский экономический журнал. 2016. № 3. С. 46.
6. Андреева Е.С. Актуализация вопросов импортозамещения и развития инноваций в современных условиях хозяйствования // Конкурентоспособность в глобально мире: экономика, наука, технологии. 2022. № 11. С. 10- 12.
7. Горюнова А.А. Влияние антироссийских санкций на выполнение задач, стоящих перед обороннопромышленным комплексом России // Власть. 2021. № 2. С. 299-304.
8. Драпеза Е.В., Андреева Е.С. Анализ актуальных для российской федерации направлений разработки импортозамещающих технологий // Экономика и бизнес: теория и практика. 2022. № 12-1. С. 128-132. doi: 10.24412/2411-0450-2022-12-1-128-132.
9. Капогузов Е.А. Импортозависимость российской гражданской авиационной промышленности // Вестник Томского государственного университета. Экономика. 2022. № 58. С. 58-76.
10. Котляр М. С 2025-го начнем поставлять. Когда Россияне увидят новый отечественный авиалайнер. 2023. URL: (дата обращения: 21.04.2025).<https://www.gazeta.ru/business/2022/12/30/16023271.shtml>
11. Петрова И.Р. Методология функционального моделирования IDEF0/ И.Р. Петрова, Р.Х. Фахртдинов, А.А.Сулейманова . – Казань: Казан. ун-т, 2018. – 68 с.

Денисова Яна Владимировна

ФГБОУ ВО «КНИТУ», г. Казань

Доцент кафедры аналитической химии,
сертификации и менеджмента качества

420015, Казань, ул. Карла Маркса, 68

E-mail: yana-denisoval@inbox.ru

Габдрахманова Кристина Раиновна

ФГБОУ ВО «КНИТУ», г. Казань

Магистр кафедры аналитической химии,
сертификации и менеджмента качества

420015, Казань, ул. Карла Маркса, 68

DENISOVA Y.V., GABDRAKHMANOVA K.R.

DEVELOPMENT AND CREATION OF IMPORT-SUBSTITUTING PRODUCTS FOR THE AVIATION INDUSTRY

Abstract. *The article examines the process of developing and creating import-substituting products for the Russian aviation industry. In the context of economic sanctions and political instability, the industry is faced with the need to reduce dependence on foreign supplies. The article analyzes key issues such as lack of investment, technological challenges, and certification difficulties, and suggests ways to address them through government support, international cooperation, and infrastructure development. Special attention is paid to successful examples, including the PD-14 aircraft engine project for the MC-21 aircraft. The article presents the aircraft manufacturing process using the IDEF0 methodology. The possibilities are outlined to describe in detail all functions, data flows and materials, as well as execution mechanisms in the production of AT. The importance of scientific research and the training of highly qualified specialists to ensure technological sovereignty is emphasized. The article will be useful to experts in the field of aircraft construction and anyone interested in import substitution in high-tech industries.*

Keywords: import substitution, aviation industry, aviation equipment, production, aircraft, development forecasts.

BIBLIOGRAPHY

1. Bragin D.A. Assessment of the current state of import substitution in the aircraft industry // Economics: yesterday, today, tomorrow. 2023. Volume 13. No. 10A. pp. 82-90. DOI: 10.34670/AR.2023.56.34.014 (accessed: 04/21/2025).
2. Andreeva E.S. Actualization of import substitution and innovation development issues in modern economic conditions // Competitiveness in the global world: economics, science, technology. 2022. No. 11. pp. 10-12.
3. Shmanev, S. V. The development of the aviation industry in Russia against the background of global geopolitical changes / S. V. Shmanev // Economics, entrepreneurship and Law. – 2025. – Vol. 15, No. 7. – DOI 10.18334/epp.15.7.123235.
4. Dutov, A.V. "Big challenges" for aviation, aircraft industry and development of aviation technologies / A.V. Dutov, V. V. Klochkov, S. M. Rozhdestvenskaya – M.: FSUE GosNIIAS, 2017, 124 p.
5. Artyushik V.D., Gusakov A.G., Tikhonov A.I. Development of the aviation industry of the Russian Federation in the context of import substitution // Moscow Economic Journal. 2016. No. 3. p. 46.
6. Andreeva E.S. Actualization of import substitution and innovation development issues in modern economic conditions // Competitiveness in the global world: economics, science, technology. 2022. No. 11. pp. 10-12.
7. Goryunova A.A. The impact of anti-Russian sanctions on the fulfillment of tasks facing the Russian defense industry. 2021. No. 2. pp. 299-304.
8. Drapeza E.V., Andreeva E.S. Analysis of relevant areas for the development of import-substituting technologies in the Russian Federation // Economics and Business: theory and practice. 2022. No. 12-1. pp. 128-132. doi: 10.24412/2411-0450-2022-12-1-128-132.
9. Kapoguzov E.A. Import dependence of the Russian civil aviation industry // Bulletin of Tomsk State University. Economy. 2022. No. 58. pp. 58-76.
10. Kotlyar M. Starting in 2025, we will start delivering. When Russians will see the new domestic airliner. 2023. URL: <https://www.gazeta.ru/business/2022/12/30/16023271.shtml> (date of reference: 04/21/2025).
11. Petrova I.R. Methodology of functional modeling IDEF0/ I.R. Petrova, R.H. Fakhrtdinov, A.A.Suleymanova. – Kazan: Kazan. Univ., 2018. – 68 p.

Denisova Yana Vladimirovna

FSBEI HE "KNRTU", Kazan

Associate Professor of the Department of Analytical Chemistry, Certification and Quality Management
68 Karl Marx St., Kazan, 420015

E-mail: yana-denisova@inbox.ru

Gabdراخمانова Kristina Rayanova

FSBEI HE "KNRTU", Kazan

Masters Degree in Analytical Chemistry, Certification and Quality Management
68 Karl Marx St., Kazan, 420015

E-mail:

© Денисова Я.В., Габдрахманова К.Р., 2025

ШЕПЕЛЕВ А.Е., СОЛОХИН С.А., ШИЛОВ И.В., ЕРШКОВ М.Н., БОГДАНОВ А.В.

ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ИМПУЛЬСАМИ СЛОЖНОЙ ВРЕМЕННОЙ ФОРМЫ

Аннотация. Несмотря на прогресс в области лазерных технологий, увеличение скорости лазерной обработки конструкционных металлов остается актуальной научно-технической задачей, имеющей практическое применение. Ее решение в большинстве случаев основано на улучшении энергетических и пространственных параметров воздействующего лазерного излучения. Это не всегда оптимально с позиции энергозатрат, требуемых для выполнения технологической операции, а также по причине возникающих побочных нежелательных эффектов в зоне лазерной обработки. Интерес представляет подход, основанный на комбинировании различных лазерных генерационных режимов. В связи с этим в настоящей работе предложен оригинальный подход, сущность которого заключается в перераспределении энергии по временной структуре лазерного импульса в соответствии с процессами, протекающими в зоне облучения. Получение таких импульсов основывается на объединении длинного импульса высокой энергии и короткого импульса-пичка высокой интенсивности. Результаты теоретических и экспериментальных исследований демонстрируют, что воздействие импульсами сложной временной формы позволяет объединить механизмы разрушения и удаления материала, обеспечивая интенсификацию процесса сверления в сравнении с облучением материалов классическими лазерными импульсами.

Ключевые слова: импульсная лазерная обработка, лазерные импульсы, временной профиль импульсов, лазерное сверление.

Введение

В настоящее время лазерная обработка наряду с традиционными методами обработки конструкционных и функциональных материалов занимает одну из передовых позиций. Несмотря на то, что использование лазерного излучения при обработке материалов позволяет обеспечить высокую точность, а также реализовать уникальные технологические решения, задача повышения эффективности и производительности обработки по-прежнему не теряет своей актуальности [1,2]. Традиционные подходы к решению этой задачи преимущественно ориентированы на совершенствование лазерных технологических комплексов, включая увеличение средней мощности и частоты следования импульсов генерируемого излучения [1,3].

Однако по мере улучшения энергетических параметров и характеристик излучения, как правило, увеличивается стоимость и усложняется конструкция лазерных комплексов. В ряде случаев это делает применение подобного рода систем экономически нецелесообразным [4]. В этой связи, перспективным направлением повышения производительности лазерной обработки представляется одновременное снижение энергетических и временных затрат, что открывает новые горизонты для экономически обоснованного энергоэффективного применения лазерных технологий.

Комбинирование различных режимов генерации лазерного излучателя создает перспективы для повышения производительности и эффективности лазерной обработки материалов, не прибегая к повышению энергетических параметров излучения. Такой комплексный подход позволяет объединить уникальные особенности и механизмы, характерные для различных режимов обработки, обеспечивая гибкое управление распределением тепловых полей в зоне воздействия лазерного излучения [5]. Это особенно важно при выполнении технологических операций скоростной размерной обработки современных перспективных конструкционных материалов, композитов, гибридов и материалов, полученных на основе аддитивных технологий производства, в частности, при необходимости реализации технологии их скоростного сверления. Производительность обработки материалов напрямую зависит от эффективности разрушения и удаления материала из зоны обработки, что, в свою очередь, определяется доминирующим механизмом взаимодействия лазерного излучения с веществом, в соответствии с физикой инициируемых процессов в зоне воздействия [6-8].

1. Теория

Для значительного повышения эффективности обработки конструкционных металлических материалов в настоящей работе предлагается применение лазерных импульсов со специальным времененным распределением энергии. Данный метод, описанный в ряде работ [9, 10], предусматривает использование комбинированных импульсов, включающих в себя одновременное сочетание длинного и короткого лазерных импульсов. Такой подход позволяет добиться оптимального воздействия на материал и, как следствие, существенного улучшения производительности. Практическая реализация данного решения основывается нами на временном перераспределении энергии по профилю лазерного импульса с сохранением его суммарной энергии и общей длительности.

Известно, что длительность лазерных импульсов является одним из доминирующих факторов в механизмах разрушения и удаления материала [7, 11]. В частности, воздействие высокоинтенсивными наносекундными импульсами вызывает абляцию материала посредством его испарения. В противоположность этому, применение высокоэнергетических импульсов миллисекундной длительности приводит к интенсивному плавлению материала с его последующим нагревом до температуры кипения. В этом случае удаление материала из зоны обработки осуществляется частично за счет испарения жидкой фазы, а также под воздействием давления образующихся паров [12, 13].

Основные тепловые процессы, возникающие в материале под воздействием лазерных импульсов миллисекундной длительности, описываются уравнением теплопроводности, которое в двумерной осесимметричной цилиндрической системе координат принимает следующую форму [14-16]:

$$c(T) \times \rho \times \frac{\partial F}{\partial T} = \lambda_T(T) \times \left(\frac{1}{r^2} \times F - \frac{1}{r} \times \frac{\partial F}{\partial r} + \frac{\partial^2 F}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} \right) + r \times Q \quad (1)$$

где: c – теплоемкость материала Дж/(г×К),

ρ – плотность материала г/см³,

λ_T – теплоемкость материала, Вт/(см×К),

Q – объемная плотность тепловыделения за счет поглощения излучения Вт/см³;

$F(r) = r \times T(r)$ – подстановка, позволяющая избежать неопределенность $(1/r) \rightarrow \infty$, возникающую в операторе ΔT .

Для моделирования процесса воздействия импульсно-периодического лазерного излучения на материал уравнение (1) решалось методом дробных шагов по времени с помощью неявной конечно-разностной схемы. Моделирование проводилось для образцов из материала сталь 3, выполненных в форме пластин толщиной 1 мм. При этом учитывались следующие начальные условия:

$$T_0(z=0) = 300K$$

$$T_0(z=l) = 300K$$

и граничные условия [15, 16]:

$$-\lambda_T \times \frac{\partial T}{\partial z_{z=0}} = (1 - R(T, \alpha)) \times \frac{P(t)}{\pi \times r^2} \times \cos \alpha - \rho \times \Delta H \times V_z \quad (2)$$

$$-\lambda_T \times \frac{\partial T}{\partial z_{z=l}} = \alpha_T \times (T_s - T_0) \quad (3)$$

где: R – коэффициент отражения материала, зависящий от температуры и угла падения излучения α ;

P – мощность импульса излучения, Вт;

r – радиус пятна излучения на поверхности материала, см;

α_T – коэффициент теплоотдачи материала Вт/(см²×К);

V_z – скорость движения фронта испарения, м/с ;

ΔH – удельная энталпия испарения, Дж/г.

При расчете учитывались следующие параметры воздействующего излучения: энергия и длительность импульса 1,2 Дж и 3 мс соответственно, частота следования импульсов 12 Гц,

диаметр пучка на облучаемой поверхности материала 0,028 см. Периодический тепловой поток в расчете задавался выражением [16]:

$$q(t) = q_0 \times \varphi(t) \quad (4)$$

где: q_0 – интенсивность излучения, поглощенного поверхностью материала Вт/см²;

$\varphi(t)$ – периодическая функция в виде серии прямоугольных импульсов с произвольным соотношением длительности и периода импульсов [16]:

$$\varphi(t) = 0, t < 0$$

$$\varphi(t) = 1, n \times T_i < t < n \times T_i + \tau_i, n = 0, 1 \dots$$

$$\varphi(t) = 0, n \times T_i + \tau_i < t < (n+1) \times T_i, n = 0, 1 \dots$$

где: τ_i – длительность импульса, с;

T_i – период следования импульсов, с.

Результаты моделирования распределения тепловых полей, возникающих в материале под воздействием серии лазерных импульсов, демонстрируют, что при частоте следования импульсов 12 Гц, поверхность образца успевает остывть до начальной температуры 300 К между импульсами. Это говорит о пренебрежимо малом взаимном тепловом влиянии лазерных импульсов на исследуемый материал. Ввиду этого, моделирование было акцентировано на исследовании механизмов разрушения, возникающих в результате действия на материал единичного лазерного импульса.

Для установления оптимального распределения энергии по длительности лазерного импульса сложной временной формы в расчете импульс классической временной формы заменялся комбинацией длинного импульса и короткого импульса-пичка (0,5 мс) высокой интенсивности при общей суммарной длительности 3 мс. Параметры длинного импульса, обеспечивающего плавление поверхностного слоя материала, были следующие: энергия 1 Дж, длительность 3 мс. Оптимальная времененная задержка к началу действия импульса-пичка относительно переднего фронта длинного импульса составила 2,5 мс. К этому моменту поверхность материала в результате действия длинного импульса нагревается до 2850К, что много выше температуры плавления, а общая длительность импульса 3 мс сохраняется неизменной. Энергия импульса-пичка изменялась от 0,035 Дж до 0,2 Дж.

Расчетный анализ поверхностного распределения температуры показывает, что воздействие импульсом сложной формы с общей энергией 1,1 Дж при энергии импульса-пичка 0,1 Дж обеспечивает нагрев поверхности до температуры 3250 Дж. Нагрев поверхности до такой же температуры обеспечивается при воздействии классическим импульсом с энергией 1,2 Дж.

При энергии импульса-пичка менее 0,1 Дж поверхность материала не достигает температуры 3250 Дж. Однако при превышении этого порога, а именно при энергии импульса-пичка свыше 0,1 Дж поверхность образца разогревается до большей температуры, чем в результате воздействия классического лазерного импульса.

Таким образом, в дальнейших расчетах параметры импульса сложной временной формы были следующие: энергия длинного импульса 1 Дж, энергия импульса-пичка 0,2 Дж, задержка генерации импульса-пичка относительно переднего фронта длинного импульса 2,5 мс.

При моделировании импульс сложной временной формы задавался с помощью выражения (4), в котором функция $\varphi(t)$ заменялась функцией $\varphi_1(t)$, учитывающей наличие короткого импульса-пичка:

$$\varphi_1(t) = 0,8 + 1 \times \frac{t - n \times T_i - 0,85 \times \tau_i}{0,15 \times \tau_i}, t - n \times T_i > 0,85 \times \tau_i$$

$$\varphi_1(t) = 1, t - n \times T_i \leq \tau_i$$

$$\varphi_1(t) = 2 \times \frac{1,1 \times \tau_i - t - n \times T_i}{0,1 \times \tau_i}, t - n \times T_i \leq 1,1 \times \tau_i$$

$$\varphi_1(t) = 0, t - n \times T_i > 1,1 \times \tau_i$$

Различие в эффективности действия лазерных импульсов классической и сложной временной формы на материал продемонстрировано на рисунке 1, на котором показано распределение температуры на поверхности образца в течение действия лазерного импульса.

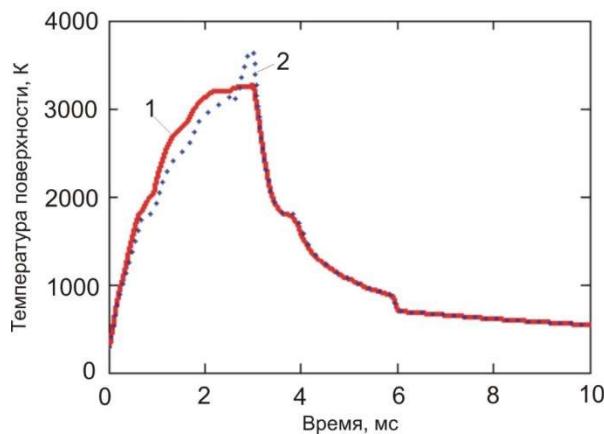


Рисунок 1 – Температура поверхности стального образца в течение действия лазерного импульса ($W = 1,2 \text{ Дж}$, $\tau = 3 \text{ мс}$) классической (1) и сложной (2) временной формы

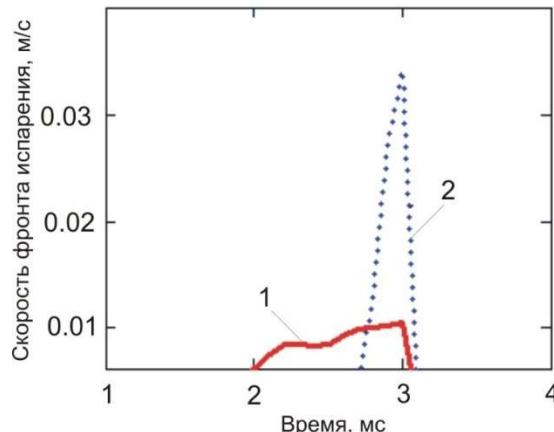


Рисунок 2 – Изменение скорости движения фронта испарения по времени при воздействии лазерных импульсов классической (1) и сложной (2) временной формы

Анализ результатов (рисунок 1) показывает, что в обоих случаях лазерного облучения температура поверхности достигает значения, превышающего температуру кипения (3133 К) материала. В частности, воздействие импульса классической временной формы обеспечивает нагрев поверхности до температуры 3213 К. При воздействии импульса сложной временной формы поверхность разогревается до температуры 3675 К.

При достижении материалом температуры кипения удаление расплава осуществляется в режиме испарения. При этом скорость движения фронта испарения в формируемом канале и начала системы координат, привязанной к поверхности испарения, связана функциональной зависимостью с температурой поверхности T_s по закону Герца - Кнудсена [9,16, 17]:

$$V_z(T_s) = \frac{0,82}{\rho} \times \sqrt{\frac{M}{2 \times \pi \times Ru \times T_s}} \times P_H(T_s) \quad (5)$$

где: M – молярная масса вещества, г/моль;

$P_H(T_s)$ – давление насыщенного пара, Па при температуре поверхности T_s , определяемое по формуле:

$$P_H(T_s) = 10^5 \times \exp \left[\frac{Lb}{Ru} \times \left(\frac{1}{T_v} - \frac{1}{T_s} \right) \right] \quad (6)$$

где: Lb – удельная теплота испарения материала, Дж/(г×атом);

T_v – температура кипения материала, К.

Изменение скорости движения фронта испарения по времени в формируемом канале при воздействии лазерных импульсов классической и сложной временной формы представлено на рисунке 2.

Согласно полученным при моделировании результатам (рисунок 2) объем испаряемого материала можно оценить по формуле:

$$V_{vp} = \pi \times r_{vp}^2 \times \int_{t_1}^{t_2} V_z(t) dt \quad (7)$$

где: r_{vp} – радиус зоны испарения, см, вычисляемый путем последовательного анализа значений температуры материала в узлах расчетной сетки.

Расчеты по (7) показывают, что в результате воздействия лазерного импульса классической временной формы объем испаряемого расплава составляет $3,8 \times 10^5 \text{ мкм}^3$. Действие импульса сложной временной формы позволяет удалить за счет испарения материал

объемом $4,4 \times 10^5$ мкм³. Таким образом, при действии лазерного импульса классической временной формы испарительный механизм удаления материала оказывается менее эффективным, чем в случае воздействия импульса сложной формы такой же энергии.

Одним из ключевых механизмов удаления расплавленного материала из зоны лазерной обработки является действие давления отдачи паров, определяемое в бесстолкновительном приближении как половина давления насыщенного пара [18].

Изменение давления отдачи паров по времени в результате действия лазерных импульсов классической и сложной временной формы представлено на рисунок 3.

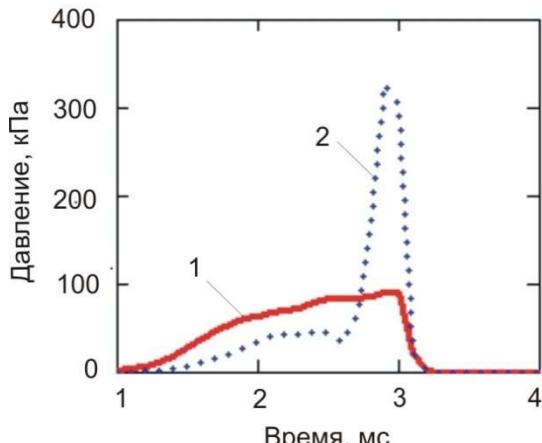


Рисунок 3 – Изменение давления отдачи паров по времени в результате действия лазерных импульсов классической (1) и сложной (2) временной формы

Результаты (рисунок 3) показывают, что в момент окончания действия лазерного импульса классической временной формы максимальное значение давления отдачи паров составляет $9,16 \times 10^4$ Па. В результате действия импульса сложной временной формы давление отдачи паров достигает значения $3,28 \times 10^5$ Па. В случае, когда давление отдачи паров превышает капиллярное давление, расплав из зоны обработки удаляется в режиме выплеска. При этом капиллярное давление можно определить по формуле [19]:

$$P_c = \frac{\sigma(T)}{r_{ms}} \quad (8)$$

где: r_{ms} – средний радиус кривизны поверхности расплава, см;

$\sigma(T)$ –поверхностное натяжение расплава, Н/м, определяемое по формуле [20]:

$$\sigma(T) = \sigma_m - \alpha 0 \times (T - T_m) \quad (9)$$

где: σ_m – поверхностное натяжение расплава при температуре плавления T_m ;

$\alpha 0$ – температурный коэффициент, Дж/(см²×К).

Расчеты по формулам (8) и (9) показывают, что в момент окончания действия лазерного импульса классической формы капиллярное давление составляет $1,7 \times 10^4$ Па, что в 5,4 раза меньше, чем формируемое к этому моменту времени давление отдачи паров ($9,16 \times 10^4$ Па). В результате действия импульса сложной временной формы разница между капиллярным давлением и давлением отдачи паров увеличивается. В этом случае значение капиллярного давления ($1,66 \times 10^4$ Па) в ~20 раз меньше давления отдачи паров ($3,28 \times 10^5$ Па).

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что при облучении материала лазерным импульсом сложной временной формы механизм удаления расплава в режиме выплеска, обусловленный действием давления паров отдачи, будет более эффективным по сравнению с действием импульса классической временной формы такой же энергии.

Таким образом, перераспределение энергии по временному профилю воздействующего лазерного импульса позволяет управлять механизмами удаления материала из зоны лазерной обработки. Использование лазерного импульса сложной временной формы приводит к увеличению эффективности испарительного механизма абляции. В частности, объем испаренного материала в результате воздействия импульса сложной формы оказывается в ~1,2 раза больше, чем при воздействии импульса классической формы. Также использование

импульса сложной формы позволяет существенно усилить механизм удаления расплавленного материала под действием давления отдачи паров в режиме выплеска, по сравнению с использованием лазерного импульса с классической временной структурой.

2. Эксперимент

В работе дополнительно были проведены экспериментальные исследования по оценке эффективности скоростного сверления отверстий малого диаметра лазерными импульсами классической и сложной временной формы в металлических образцах толщиной 0,5 мм, 1 мм, 1,2 мм и 1,5 мм. Мишенные образцы были изготовлены в виде пластин из материалов с разняющимися теплофизическими свойствами – сталь 3 и титановый сплав ВТ1-0. Эффективность обработки оценивалась по времени сверления сквозного отверстия в образцах.

В качестве источника излучения использовался твердотельный YAG:Nd³⁺-лазер с ламповой накачкой. Излучатель лазера представлял собой плоскопараллельный линейный резонатор с двумя последовательно установленными кванtronами ТД2.424.005, содержащими активные элементы размером $\varnothing 6,3 \times 90$ мм. Для накачки использовались блок питания ИПЛ7-200, генерирующий импульсы накачки длительностью 0,6 – 4 мс, и блок ИПЛ7-200-М, формирующий импульсы накачки длительностью 0,5 – 2 мс. Реализованная между блоками питания ламп накачки линия задержки обеспечивала генерацию лазерных импульсов сложной временной формы (рисунок 4). При работе каждого блока питания в отдельности осуществлялась генерация лазерных импульсов классической временной формы.

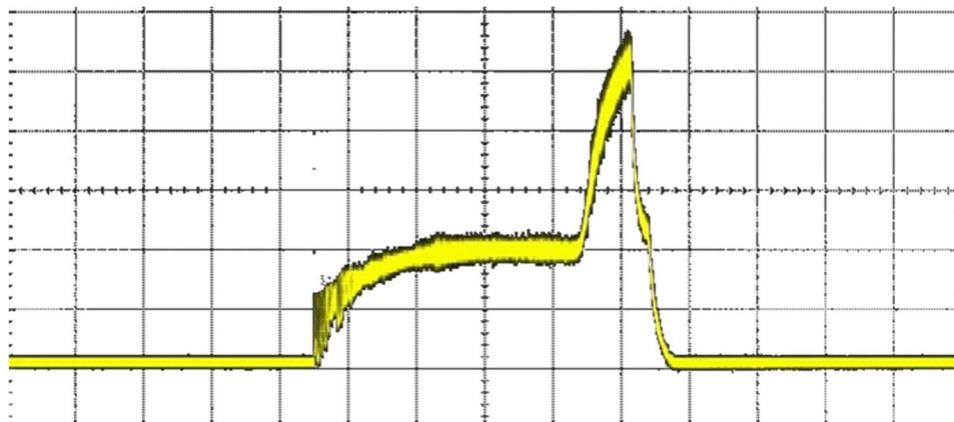


Рисунок 4 – Оциллограмма лазерного импульса сложной временной формы

Для обработки экспериментальных образцов использовались лазерные импульсы с энергией 1,2 Дж, длительностью 3 мс и частотой следования 12 Гц. В импульсах сложной формы энергия длинного импульса составляла 1 Дж, энергия короткого импульса – 0,2 Дж, частота следования также 12 Гц. Использование однолинзового объектива с фокусным расстоянием 100 мм позволяло на поверхности обрабатываемого образца фокусировать пучок диаметром 280 мкм.

3. Результаты

Зависимости времени сверления сквозных отверстий лазерными импульсами классической и сложной временной формы от толщины обрабатываемых образцов, изготовленных из стали 3, представлены на рисунке 5.

Результаты, представленные на рисунке 5, показывают, что при воздействии лазерных импульсов классической временной формы предельная глубина обработки составляет 1,2 мм. Воздействие импульсами сложной временной формы позволяет сократить время сверления отверстия в образце толщиной 0,5 мм в 1,3 раза, в образце толщиной 1 мм – в 2,4 раза, в образце толщиной 1,2 мм – в 2,1 раза. При этом возможно увеличение глубины обработки вплоть до 1,5 мм, то есть в 1,25 раза больше, чем при обработке классическими импульсами.

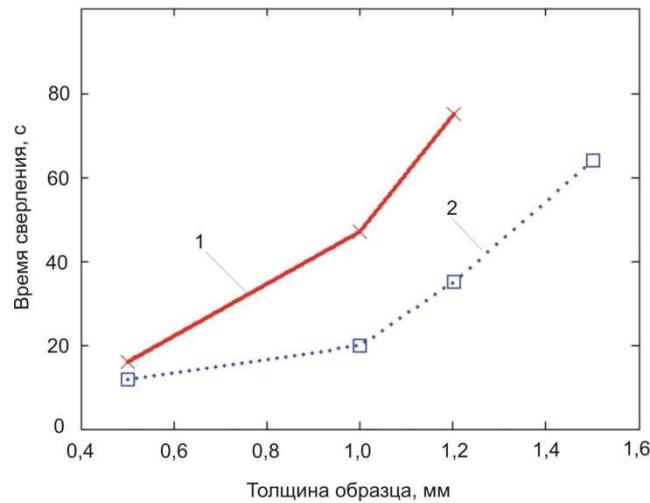


Рисунок 5 – Зависимости времени сверления отверстий лазерными импульсами классической (1) и сложной (2) временной формы от толщины обрабатываемых образцов из стали 3

Зависимости времени сверления сквозных отверстий лазерными импульсами классической и сложной временной формы от толщины обрабатываемых образцов, изготовленных из титанового сплава BT1-0, представлены на рисунке 6.

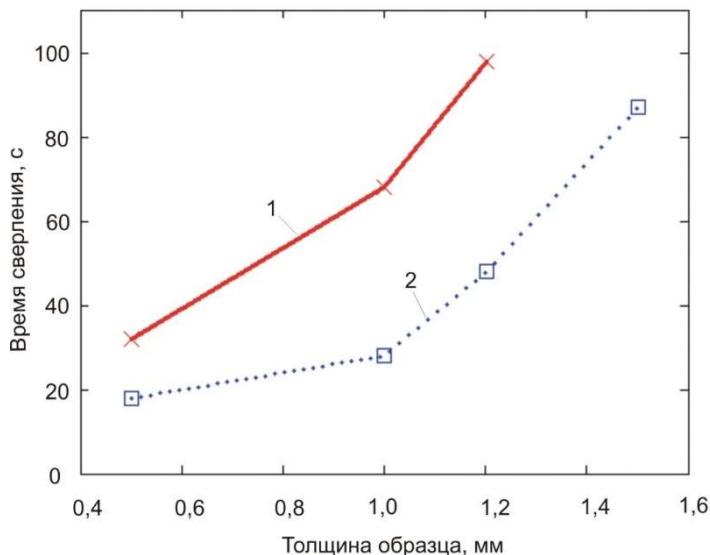


Рисунок 6 - Зависимости времени сверления отверстий лазерными импульсами классической (1) и сложной (2) временной формы от толщины обрабатываемых образцов из сплава BT1-0

Результаты (рисунок 6) демонстрируют, что воздействие лазерными импульсами классической временной формы обеспечивает предельную глубину обработки титанового сплава 1,2 мм. Воздействие импульсами сложной временной формы позволяет сократить время сверления отверстия в образце толщиной 0,5 мм в 1,8 раза, в образцах толщиной 1 мм и 1,2 мм – в 2,4 и в 2,1 раза соответственно. Также глубина обработки возрастает до 1,5 мм, что в 1,25 раза больше, чем при воздействии классическими импульсами.

Заключение

Таким образом, перераспределение энергии по временному профилю воздействующего лазерного импульса позволяет повысить эффективность разрушения металлических конструкционных материалов. При общей длительности 3 мс и энергии 1,2 Дж оптимальные параметры импульса сложной формы, с перераспределенной энергией, следующие: энергия длинного импульса 1 Дж, энергия короткого импульса-пичка 0,2 Дж при длительности 0,5 мс, задержка генерации импульса-пичка от начала генерации лазерного импульса 2,5 мс.

Результаты моделирования показали, что Воздействие на материал лазерным импульсом сложной временной формы приводит к интенсификации удаления расплава из зоны обработки за счет испарения, а также за счет действия давления паров отдачи по сравнению с воздействием импульсом классической формы.

Экспериментально установлено, что использование лазерных импульсов сложной временной формы позволяет увеличить глубину обработки стали 3 и титанового сплава ВТ1-0 с 1,2 мм до 1,5 мм по сравнению с действием классических импульсов.

Результаты экспериментальных исследований также показали, что обработка импульсами сложной формы образцов из стали 3 позволяет сократить время сверления сквозных отверстий в 1,3 – 2,4 раза по сравнению с воздействием импульсами классической формы аналогичной энергии. Для образцов из сплава ВТ1-0 время сверления сокращается в 1,8 – 2,4 раза.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-20294

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Применение импульсно-периодического режима для повышения эффективности лазерной обработки. / В. В. Апоплонов, О. Г. Девойно, А. С. Калининский // Журнал «Наука и техника». – 2014. – №4. – С. 37-41.
2. Laser-based manufacturing II. / A. Riveiro, R. Comesañá, P. Pou-Álvarez, M. González-Quintas, E. Calvo-García // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2025. – №9 (60).
3. Абляция стали при облучении поверхности tandemными импульсами высокой интенсивности. / В.В. Кононенко, В.И. Конов // Квантовая электроника. – 2018. – №1 (48). – С. 40-44.
4. Хтет А.Л. Разработка технологии лазерной обработки сталей совмещенными источниками нагрева для повышения эффективности процесса. Дис... канд. техн. наук, Москва, 2018. 169 с.
5. Дистанционная обработка металлов излучением двух лазеров. / А.Ф. Глова, С.В. Дробязко, О.И. Вавилин, Е.М. Швом // Квантовая электроника. – 2002. – №2 (32). – С. 169-171.
6. Избранные задачи теории лазерной абляции. / С.И. Анисимов, Б.С. Лукьянчук // Успехи физических наук. – 2002. – №3 (172). – С. 301-333.
7. Сравнительный анализ лазерных систем для микрообработки материалов. / А.Г. Григорьянц, М.А. Казарян, Н.А. Лябин, И.Н. Шиганов // Фотоника. – 2019. – №3 (13). – С. 264-279.
8. Некоторые особенности взаимодействия лазерного излучения с металлами. / А.Н. Глотов, Ю.В. Голубенко, В.А. Десяцков, А.В. Степанов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2020. – №1. – С. 15-32.
9. Numerical study of the dynamics of the hole formation during drilling with combined ms and ns laser pulses / Yuan Qina, Daniel J. Förster, Rudolf Weber, Thomas Graf, Sen Yang // Optics and Laser Technology. – 2019. – 112. – P. 8-19.
10. Hybrid laser drilling of cooling holes by using millisecond pulsed fiber laser radiation and ultrashort pulsed laser radiation / H. Uchtmann, D. Kuerschner and I. Kelbassa // Proceedings of LAMP2015 - the 7th International Congress on Laser Advanced Materials Processing. – 2015. – pp. 1–7.
11. Практика прецизионной лазерной обработки./ Е.Д. Вакс, М.Н. Миленький, Л.Г. Сапрыкин. М.: Техносфера, 2013. – 696 с.
12. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / Под ред. В.Я. Панченко. М.: Физматлит, 2009. – 664 с.
13. Начальная стадия эволюции гидродинамических параметров при глубоком проплавлении металлов мощным лазерным излучением. / Р.Д. Сейдгазов, Ф.Х. Мирзаде // Письма в ЖТФ – 2022. – 84 (18). – С. 24-27.
14. Особенности реализации численных схем решения двумерного уравнения теплопроводности в цилиндрических координатах. / А.А. Чермошенцева, И.С. Плотникова, М.О. Карноушенко // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2011. – вып. 17. – С. 79-83.
15. Моделирование теплофизических процессов импульсного лазерного воздействия на металлы. / А.А. Углов, И.Ю. Смуров, А.М. Лашин, А.Г. Гуськов. М.: Наука, 1991. – 288 с.
16. Тепловые процессы в материалах, индуцированные высокоинтенсивным лазерным излучением: монография. / И.В. Шилов, А.В. Федин. Ковров, ГОУ ВПО «КГТА им. В.А. Дегтярева», 2010. – 156 с.
17. Воздействие лазерного излучения на материалы. / Р.В. Арутюнян, В.Ю. Баранов, Л.А. Большов, Д.Д. Малюта, А.Ю. Себрант. М.: Наука, 1989. – 367 с.
18. О влиянии давления отдачи при испарении на движение частиц порошка в световом поле при лазерной наплавке. / И.О. Ковалева, О.Б. Ковалев // Прикладная механика и техническая физика. – 2012. – №1. – С. 67-79.
19. Левин Ю.Ю. Исследование и разработка технологического процесса импульсной лазерной сварки тонкостенных алюминиевых конструкций. Автореферат дис... канд. тех. наук, Москва, 2008. 24 с.

20. Численное моделирование селективного лазерного плавления методом SPH. / А.Н. Быков, А.М. Вишнякова, Ю.Н. Дерюгин, А.Б. Емельянов, А.А. Лазарев, С.Н. Полищук, К.В. Черенкова // Журнал Средневолжского математического общества. – 2022. – №4 (24). – С. 419-435.

Шепелев Александр Евгеньевич

КГТА им. Дегтярева, г. Ковров

Младший научный сотрудник

601910, г. Ковров, Маяковского ул., д. 19,

Тел.: +7 (915) 777-58-99

E-mail: ae_shepelev@mail.ru

Солохин Сергей Александрович

КГТА им. Дегтярева, г. Ковров

К. ф-м. н., доцент, заведующий кафедрой лазерных и оптико-электронных систем

601910, г. Ковров, Маяковского ул., д. 19,

Тел.: (49232) 6-96-00 доб. 321

E-mail: solohin@dksta.ru

Шилов Игорь Вячеславович

КГТА им. Дегтярева, г. Ковров

К. т. н., доцент, доцент кафедры лазерных и оптико-электронных систем

601910, г. Ковров, Маяковского ул., д. 19,

Тел.: (49232) 6-96-00 доб. 321

E-mail: shilov@dksta.ru

Ершков Михаил Николаевич

КГТА им. Дегтярева, г. Ковров

Старший преподаватель кафедры лазерных и оптико-электронных систем

601910, г. Ковров, Маяковского ул., д. 19,

Тел.: (49232) 6-96-00 доб. 321

E-mail:ershkov@dksta.ru

Богданов Александр Владимирович

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

К. т. н., доцент, доцент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении»

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 576,

Тел.: (499) 261-39-27

E-mail: mtbmstu@mail.ru

SHEPELEV A.E., SOLOKHIN S.A., SHILOV I.V., ERSHKOV M.N., BOGDANOV A.V.

LASER PROCESSING OF STRUCTURAL MATERIALS WITH PULSES OF COMPLEX TIME SHAPE

Abstract. Despite the progress in the field of laser technologies, increasing the speed of laser processing of structural metals remains a pressing scientific and technical task with practical application. Its solution in most cases is based on improving the energy and spatial parameters of the acting laser radiation. This is not always optimal from the standpoint of energy consumption required to perform the technological operation, as well as due to the resulting side undesirable effects in the laser processing zone. Of interest is the approach based on the combination of various laser generation modes. In this regard, in this paper an original approach is proposed, the essence of which lies in the redistribution of energy over the temporal structure of the laser pulse in accordance with the processes occurring in the irradiation zone. The production of such pulses is based on the combination of a long high-energy pulse and a short high-intensity spike pulse. The results of theoretical and experimental studies demonstrate that exposure to pulses of complex time shape allows combining the mechanisms of destruction and removal of material, ensuring the intensification of the drilling process in comparison with irradiation of materials with classical laser pulses.

Keywords: pulsed laser machining, laser pulses, pulse time profile, laser drilling.

BIBLIOGRAPHY

1. Application of pulse-periodic mode to increase the efficiency of laser processing. / V. V. Apollonov, O. G. Devoyno, A. S. Kalininsky // Science and Technology Journal. - 2014. - No. 4. - P. 37-41
2. Laser-based manufacturing II. / A. Riveiro, R. Comesaña, P. Pou-Álvarez, M. González-Quintas, E. Calvo-García // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2025. – №9 (60).
3. Ablation of steel by irradiating the surface with tandem pulses of high intensity. / V.V. Kononenko, V.I. Konov // Quantum Electronics. – 2018. – No. 1 (48). – P. 40-44.
4. Khtet A.L. Development of technology for laser processing of steels with combined heating sources to improve process efficiency. Diss... Cand. of Technical Sciences, Moscow, 2018. 169 p.
5. Remote processing of metals by radiation of two lasers. / A.F. Glova, S.V. Drobiazko, O.I. Vavilin, E.M. Shvom // Quantum Electronics. – 2002. – No. 2 (32). – P. 169-171.
6. Selected problems of the theory of laser ablation. / S.I. Anisimov, B.S. Lukyanchuk // Uspekhi fizicheskikh nauk. – 2002. – No. 3 (172). – P. 301-333.

7. Comparative analysis of laser systems for microprocessing of materials. / A.G. Grigoryants, M.A. Kazaryan, N.A. Lyabin, I.N. Shiganov // Photonics. – 2019. – No. 3 (13). – P. 264-279.
8. Some features of the interaction of laser radiation with metals / A.N. Glotov, Yu.V. Golubenko, V.A. Desyatskov, A.V. Stepanov // Bulletin of Bauman Moscow State Technical University. Series: Instrument Engineering. – 2020. – No. 1. – P. 15-32.
9. Numerical study of the dynamics of the hole formation during drilling with combined ms and ns laser pulses / Yuan Qina, Daniel J. Förster, Rudolf Weber, Thomas Graf, Sen Yang // Optics and Laser Technology. – 2019. – 112. – P. 8-19.
10. Hybrid laser drilling of cooling holes by using millisecond pulsed fiber laser radiation and ultrashort pulsed laser radiation / H. Uchtmann, D. Kuerschner and I. Kelbassa // Proceedings of LAMP2015 - the 7th International Congress on Laser Advanced Materials Processing. – 2015. – pp. 1-7.
11. Practice of precision laser processing. / E.D. Vaks, M.N. Milenkiy, L.G. Saprykin. Moscow: Tekhnosfera, 2013. – 696 p.
12. Laser technologies of materials processing: modern problems of fundamental research and applied developments / Ed. V.Ya. Panchenko. Moscow: Fizmatlit, 2009. – 664 p.
13. Initial stage of evolution of hydrodynamic parameters during deep penetration of metals by powerful laser radiation. / R.D. Seydgazov, F.Kh. Mirzade // Letters to the Journal of Technical Physics – 2022. – 84 (18). – P. 24-27.
14. Features of the implementation of numerical schemes for solving the two-dimensional heat equation in cylindrical coordinates. / A.A. Chermoshentseva, I.S. Plotnikova, M.O. Karnoushenko // Bulletin of Kamchatka State Technical University. – 2011. – issue. 17. – P. 79-83.
15. Modeling of thermophysical processes of pulsed laser action on metals. / A.A. Uglov, I.Yu. Smurov, A.M. Lashin, A.G. Guskov. Moscow: Science, 1991. – 288 p.
16. Thermal processes in materials induced by high-intensity laser radiation: monograph. / I.V. Shilov, A.V. Fedin. Kovrov, FSEI of HPE “KSTA named after V.A. Degtyarev”, 2010. – 156 p.
17. Effect of laser radiation on materials. / R.V. Arutyunyan, V.Yu. Baranov, L.A. Bolshov, D.D. Malyuta, A.Yu. Sebrant. Moscow: Nauka, 1989. – 367 p.
18. On the influence of recoil pressure during evaporation on the movement of powder particles in a light field during laser cladding. / I.O. Kovaleva, O.B. Kovalev // Applied Mechanics and Technical Physics. – 2012. – No. 1. – P. 67-79.
19. Levin Yu.Yu. Research and development of the technological process of pulsed laser welding of thin-walled aluminum structures. Abstract of the dissertation of Cand. of Technical Sciences, Moscow, 2008. 24 p.
20. Numerical modeling of selective laser melting by the SPH method. / A.N. Bykov, A.M. Vishnyakova, Yu.N. Deryugin, A.B. Emelianov, A.A. Lazarev, S.N. Polischuk, K.V. Cherenkova // Journal of the Middle Volga Mathematical Society. – 2022. – No. 4 (24). – P. 419-435.

Shepelev Aleksandr Evgenievich
KSTA named after V.A. Degtyarev, Kovrov
Junior Research Fellow
601910, Kovrov, Mayakovskogo st., 19,
Tel.: +7 (915) 777-58-99
E-mail: ae_shepelev@mail.ru

Solokhin Sergey Aleksandrovich
KSTA named after V.A. Degtyarev, Kovrov
PhD, Associate Professor, Head of the Department of
laser and optoelectronic systems
601910, Kovrov, Mayakovskogo st., 19,
Tel.: (49232) 6-96-00 add. 321
E-mail: solohin@dksta.ru

Shilov Igor Vyacheslavovich
KSTA named after V.A. Degtyarev, Kovrov
PhD, Associate Professor, Associate Professor of the
Department of laser and optoelectronic systems
601910, Kovrov, Mayakovskogo st., 19,
Tel.: (49232) 6-96-00 add. 321
E-mail: shilov@dksta.ru

Ershkov Mikhail Nikolaevich
KSTA named after V.A. Degtyarev, Kovrov
Senior Lecturer of the Department of laser and
optoelectronic systems
601910, Kovrov, Mayakovskogo st., 19,
Tel.: (49232) 6-96-00 add. 321
E-mail: ershkov@dksta.ru

Bogdanov Aleksandr Vladimirovich
Bauman Moscow State Technical University, Moscow
PhD, Associate Professor, Associate Professor of the
Department of “Laser technologies in mechanical
engineering”
105005, Moscow, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 57b,
Tel.: (499) 261-39-27
E-mail: mtbmstu@mail.ru

БАРСУКОВ Г.В., КОЖУС О.Г., ЖУРАВЛЕВА Т.А.,
БАРАНОВ Ю.Н., ВЛАСОВ В.В., ПРАСОЛОВ Е.А.

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ РАСКРЫВАЕМОСТИ ЧАСТИЦ МЕДНОГО ШЛАКА ПРИ УДАРЕ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ГИДРОАБРАЗИВНОМ РЕЗАНИИ

Аннотация. Авторами статьи разработана теоретическая модель селективного разрушения частицы медного шлака, с учетом условий трансформации внешних воздействий во внутренние напряжения. Главной особенностью модели является использование минимального числа определяющих параметров, оказывающих наиболее сильное влияние на процесс разрушения частицы медного шлака от режимов ударного взаимодействия. Выбор небольшого числа характерных для данной задачи параметров, определяющих в основном процесс высокоскоростного взаимодействия тел, будет весьма полезным при создании рациональной методики численного эксперимента.

Ключевые слова: моделирование, абразив, медный шлак, гидроабразивное резание, селективное разрушение, дезинтегратор

1. Введение

Процесс гидроабразивного резания (ГАР) является наиболее эффективным процессом для операций механической обработки. Традиционно этот процесс используется для фигурной и линейной резки листов и пластин, а также для литья широкого спектра материалов [1].

С развитием этой технологии появилась возможность использовать ГАР для многочисленных операций механической обработки, таких как удаление заусенцев, полировка, резка, точение и фрезерование.

Абразив, используемый при выполнении операций резки, является ключевым фактором себестоимости, точности и производительности. Поскольку резание осуществляется с помощью абразивного материала, а вода обеспечивает эффективную скорость гидроабразивной струи для выполнения операции резки. В гидроабразивном резании используются следующие абразивные материалы: гранат, кварцевый песок, оксид алюминия, карбид кремния и др. [2].

Наиболее распространенным типом абразива для ГАР является гранат, который считается довольно твердым и стойким. Гранатовый абразив для гидроабразивной обработки выпускается в двух основных вариантах: горный и аллювиальный.

Гранат имеет более низкую цену, чем другие абразивы с аналогичной твердостью. Поэтому он широко используется при резке материалов методом ГАР. Однако следует учитывать, что большую глубину резания можно получить с помощью альтернативного абразива, например, электрокорунда, карбида кремния. Эксплуатационные расходы на ГАР при этом могут быть снижены, поскольку уменьшится удельная энергия резания, необходимая для достижения той же глубины резания. С другой стороны использование более твёрдых типов абразивов может привести к сокращению срока службы фокусирующего сопла в 10 раз.

В России эксплуатируется более 2000 установок для гидроабразивного резания. Так как в нашей стране отсутствует промышленно добываемый гранатовый песок, его закупают в Китае, Иране, Австралии и других странах. Поэтому поиск альтернативных вариантов абразива является актуальной задачей, обеспечивающей технологическую безопасность российского производства.

В настоящее время в России накоплено более 1 млн. тонн шлаковых отходов цветной металлургии, которые, в частности, нашли применение для пескоструйной обработки. Химический, фазовый и гранулометрический состав шлаков всегда вызывал большой интерес в связи с их использованием в производственных процессах или применением для других целей, таких как извлечение определенных металлов или производство строительных материалов.

Основные фазы, формирующиеся в ходе каждого процесса кристаллизации, известны и зависят от условий охлаждения шлака на различных этапах производственного процесса. Поскольку шлакообразующие добавки (флюсы) основаны на кремнии, алюминии, кальции и магнии, образуются соединения, аналогичные минералам, что схоже с процессом кристаллизации в природных силикатных расплавах, таких как вулканическая лава или магма.

Однако, использование частиц медного шлака для гидроабразивного резания показало значительное снижение производительности резки, которая не превышала 20 мм/мин. Повышение его расхода не дало значительного прироста эффективности резания [3]. При соизмеримой твердости медного шлака и гранатового песка низкая режущая способность зерен медного шлака обусловлена полиминеральным строением, наличием пор и стеклянных фаз, которые разрушаются относительно легко.

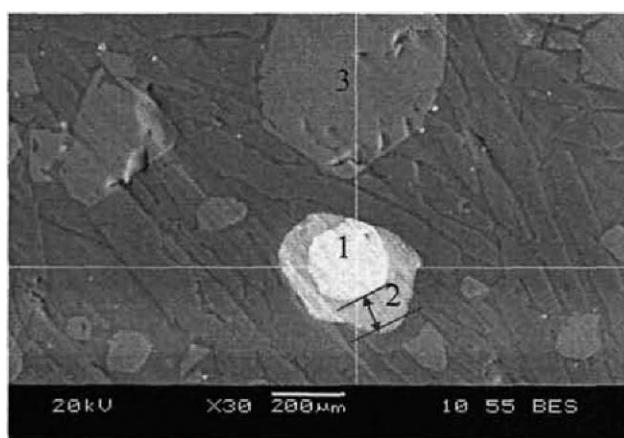
Шлаки плавильной печи и конвертерные шлаки в производстве меди содержат в основном фаялит, что обусловлено особенностями производственного процесса.

Фаялит является распространенным представителем группы минералов оливина. Оливин это силикатный минерал с формулой M_2SiO_4 , где M чаще всего представляет собой железо (Fe) или магний (Mg). Фаялит (Fe_2SiO_4) и форстерит (Mg_2SiO_4) образуют твердый раствор замещения, в котором атомы железа и магния могут замещать друг друга без значительного изменения кристаллической структуры [4].

Включения фаялита имеют широкий диапазон крупности от 50 до 300 мкм и соответствует размеру абразива для гидроабразивного резания 150 – 350 мкм.

Медные шлаки ЗАО «Карабашмедь» содержат, кроме включений 1 - медноносный пирротин; 2 - реакционная каемка халькопирита, борнита, и металлической меди, частично кристаллизовавшиеся зерна вюстита с примесями цинка, хрома и алюминия. Микроструктура медных шлаков приведена на рисунке 1 [5].

Второй вид включений представляет собой концентрически-зональную текстуру замещения — круглое включение металлической меди, покрытое реакционной каемкой. Реакционная каемка, представляющая собой основную матрицу, в которой кремний частично замещен на алюминий, т. е. происходит последовательное окаймление одной фазы другой, с образованием на границе контакта цинковой шпинели [5].



*Рисунок 1 – Микроструктура шлака ЗАО «Карабашмедь» [5]:
1 – металлическая медь; 2 – цинковая шпинель; 3 – вюстит*

Отделение стеклянных фаз от кристаллической структуры частицы медного шлака в процессе селективного разрушения позволит раскрыть железното-оливиновую (фаялитовую) минеральную фазу, обладающей кристаллическим строением и достаточной твердостью (7,5 по шкале Мооса), соизмеримую с твердостью гранатового песка.

2. Основная часть

Под селективным разрушением, включающим в себя дезинтеграцию материала при дроблении или измельчении, принято понимать избирательное (целенаправленное) и управляемое разделение слагающих его компонентов на отдельные составляющие. Селективное раскрытие предполагает освобождение минералов преимущественно по

границам их срастания и сохранение исходного гранулометрического состава, или же освобождение извлекаемого минерала от посторонних включений, содержащихся в нем, с разрушением минерала – матрицы опять же по границам раздела [6].

Растягивающие нагрузки оказывают более сильное влияние на приграничные зоны, под действием которых трещина при начавшемся разрушении может двигаться по поверхности срастания примерно до $\pm 45^\circ$ от $\theta = 0 - 180^\circ$. Анализ растягивающих σ_{kk} и угловых напряжений σ_{00} для различных минералов показывает, что если жесткость минерала включения выше, чем матрицы, то преимущественная концентрация напряжений наблюдается в той части поверхности срастания, которая перпендикулярна главному направлению внешних нагрузок. В областях, перпендикулярных внешним нагрузкам на границе срастания, формируется протяженная зона растягивающих напряжений. Так, если матрица медного шлака хрупкая, а растягивающие напряжения намного ниже, чем сжимающие, то зоны растягивающих напряжений оказывают большее влияние на разрушение границ срастания, чем тормозящие сжимающие напряжения [6].

Напряженное и деформированное состояния материала в объемной части B_v^α фазы частицы медного шлака B^α предполагаются однородными, так как их возмущения, вызванные появлением свободной границы, здесь гаснут, а возмущения, связанные с ее кривизной, малы по сравнению с возмущениями в поверхностном слое B_v^α , не замененном слоем с осредненными характеристиками. Поэтому действие объемной части B_v^α фазы медного шлака B^α на слой B_v^β предлагается характеризовать действием распределенной вдоль серединной поверхности осредненного слоя B_v^α нагрузки p . Более того, предлагается учитывать при этом только нормальную к плоскости А нагрузку. Со стороны слоя B_v^α на слой B_v^β действует нелокальная сила притяжения $f_A^{\beta\alpha}(y)$ (рисунок 2). В этом случае нагрузка имеет следующую плотность:

$$q(x, y) = p - f_A^{\beta\alpha}(x, y) \quad (1)$$

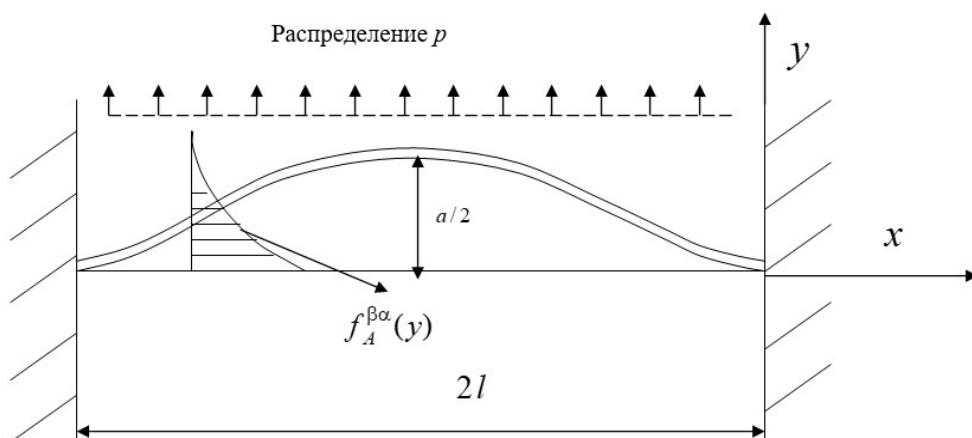


Рисунок 2 – Расчетная схема для поверхности трещины

На основе законов механики хрупкого разрушения и теории Грифитса, исследуя поля энергии упругих деформаций, можно утверждать, что в местах, где энергия упругих деформаций W стремится или равна нулю, происходит зарождение трещины в хрупкой частице медного шлака.

Анализ полей напряжений дает возможность определить замкнутые приграничные области, где они равны нулю, что позволяет говорить о благоприятных условиях развития трещин в хрупкой частице медного шлака.

Основные выражения для определения зависимости разрушения хрупкой частицы медного шлака от динамики и кинематики ударного взаимодействия это уравнения неразрывности и уравнения движения в переменных Лагранжа [7]:

$$\frac{1}{\phi+1} \frac{\partial}{\partial r} (r+u)^{\phi+1} = \frac{\rho_0}{\rho} r^\phi,$$

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

где r - начальное расстояние частицы от центра симметрии;

u - смещение частицы;

t - время;

ρ_0 , ρ – начальная и текущая массовая плотность частиц;

Φ - соответственно для сферического, цилиндрического и плоского случая движения.

Уравнение движения и сохранения массы для несжимаемой среды в нашем случае имеют вид:

$$\begin{cases} \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial r} (r+u)^3 = \frac{\rho_0}{\rho} r^2, \\ \rho_0 r^2 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (r+u)^2 \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + (\sigma_r + \sigma_\theta) \frac{\partial}{\partial r} (r+u)^2. \end{cases} \quad (1)$$

Решая совместно эти уравнения, с учетом граничных и начальных условий, получим выражение для определения напряжений на поверхности хрупкой частицы медного шлака сферической формы в любой момент контакта.

Условие пластичности запишем в следующем виде:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \nu \sigma_1 - \frac{\tau_0 (H_1 + H_2)^n}{1 + \mu} \quad (2)$$

где n - степень анизотропии

Степень анизотропии можно определить из выражения:

$$n = \frac{I_3(\sigma_{ij})}{I_1(\sigma_{ij}) I_2(\sigma_{ij})} \quad (3)$$

где σ_{ij} - симметричный тензор пределов текучести для анизотропного материала, значение компонент которого для различных материалов определяются экспериментально

I_1, I_2, I_3 - соответственно первый, второй и третий инвариант тензора начального состояния материала

Решая систему уравнений (1) получим выражение для определения давления на поверхности сферической хрупкой частицы медного шлака в следующем виде:

$$\begin{aligned} P = & - \left(\frac{1}{1-b} \right)^v \left(P_a + \rho_0 (1-b) \left(\frac{dc_*}{dt} \right)^2 H_{1*}^2 \right) + a_0 \left\{ \frac{\tau_0}{a_0 \nu (1+\mu)} \left[1 - \left(\frac{1}{1-b} \right)^v \right] + \right. \\ & + \frac{\rho}{2(v-1)} \left(\frac{d^2 c_*}{dt^2} H_{1*} + \frac{1}{a_0} \left(\frac{dc_*}{dt} \right)^2 (2H_{1*}^2 - H_{2*}^2) \right) \left[1 - \left(\frac{1}{1-b} \right)^{v-1} \right] - \\ & \left. - \frac{\rho}{a_0(v-2)} \left(\frac{dc_*}{dt} H_{1*} \right)^2 \left[1 - \left(\frac{1}{1-b} \right)^{v-2} \right] \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

Обращение правой части выражения (4) в ноль, означает, что в точках поверхности сферической частицы медного шлака происходит отрыв среды от ее поверхности.

Для определения силы сопротивления, действующей на проникающую частицу медного шлака в материал преграды (лопастей дезинтегратора), имеем:

$$F = 2\pi a_0^2 \int_0^{\theta_0} P \cos \theta \sin \theta d\theta$$

где θ_0 - угол при котором происходит отрыв среды материала.

Рассмотрим задачу о проникании сферической хрупкой частицы медного шлака в материал преграды при ударе о лопасть дезинтегратора, когда угол между контактной поверхностью и осью симметрии внедряемой частицы составляет α .

Для решения задачи сделаем допущение, что угловая скорость вращения частицы медного шлака вокруг оси симметрии отсутствует, а вокруг центра масс равна нулю в начальный момент контакта.

Избыточное давление, действующее на поверхность контакта сферической частицы медного шлака с материалом преграды, определим по зависимости (4) с учетом того что:

$$H_{1*} = \cos \theta = \frac{a_0 - \Delta}{a_0}, \quad (5)$$

$$H_{2*} = \sin \theta = \frac{\sqrt{2a_0\Delta - \Delta^2}}{a_0}. \quad (6)$$

$$\begin{aligned} P = & -\left(\frac{1}{1-b}\right)^v \left(P_a + \rho_0(1-b) \left(\frac{dc_*}{dt} \right)^2 \left(\frac{a_0 - \Delta}{a_0} \right)^2 \right) + \\ & + a_0 \left\{ \frac{2\tau_0}{a_0(1+\mu)} \left(\frac{1}{2\nu} \left[1 - \left(\frac{1}{1-b} \right)^\nu \right] \right. \right. + \\ & + \frac{2\sqrt{2a_0\Delta - \Delta^2}}{a_0(2\nu+1)} \left[1 - \left(\frac{1}{\sqrt{1-b}} \right)^{2\nu+1} \right] + \frac{2a_0\Delta - \Delta^2}{a_0^2(2\nu+2)} \left[1 - \left(\frac{1}{1-b} \right)^{\nu+1} \right] \left. \right\} + \\ & + \frac{\rho}{2(\nu-1)} \left(\frac{a_0 - \Delta}{a_0} \frac{d^2 c_*}{dt^2} + \frac{1}{a_0} \left(\frac{dc_*}{dt} \right)^2 \left(2 \left(\frac{a_0 - \Delta}{a_0} \right)^2 - \frac{2a_0\Delta - \Delta^2}{a_0^2} \right) \right) \times \\ & \times \left[1 - \left(\frac{1}{1-b} \right)^{\nu-1} \right] - \frac{\rho}{a_0(\nu-2)} \left(\frac{dc_*}{dt} \left(\frac{a_0 - \Delta}{a_0} \right) \right)^2 \left[1 - \left(\frac{1}{1-b} \right)^{\nu-2} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

где $\theta = \arcsin \frac{\sqrt{2a_0\Delta - \Delta^2}}{a_0}$

Учитывая, что проникание хрупкой частицы медного шлака в преграду осуществляется под определенным углом, то можно записать следующую систему уравнений движения частицы по поверхности контактируемого тела:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 \eta}{dt^2} = P(S_y \sin(\alpha_0 - \phi) - S_x \cos(\alpha_0 - \phi)) \\ m \frac{d^2 \zeta}{dt^2} = -P(S_y \cos(\alpha_0 - \phi) + S_x \sin(\alpha_0 - \phi)) \\ I \frac{d^2 \phi}{dt^2} = P([Y_2 + (2a_0 - \eta) \cos(\alpha_0 - \phi)] S_x - [X_1 + (2a_0 - \eta) \sin(\alpha_0 - \phi)] S_y) \end{cases}$$

где m - масса сферической хрупкой частицы;

I - экваториальный момент инерции;

S_y, S_x - проекции площади контакта

Начальные условия для системы уравнений:

$$\begin{array}{lll} \frac{d\eta(0)}{dt} = V_0 \sin \alpha_0 & \frac{d^2\eta(0)}{dt^2} = 0 \\ \eta(0) = a_0 & \frac{d\zeta(0)}{dt} = V_0 \cos \alpha_0 & \frac{d^2\zeta(0)}{dt^2} = 0 \\ \zeta(0) = 0 & \frac{d\phi(0)}{dt} = 0 & \frac{d^2\phi(0)}{dt^2} = 0 \\ \phi(0) = \alpha_0 & \end{array}$$

Для определения напряжения в сферической частице медного шлака воспользуемся соотношениями теории упругости, для полярной системы координат с некоторыми допущениями.

Пусть на внешнюю кромку первой области хрупкой частицы медного шлака действует нагрузка в виде:

$$P = P_{\max} \cos\left(\frac{\pi\theta}{\theta_0}\right)$$

где P_{\max} - значения давления при $\sin(\theta) = 0$;

θ_0 - угол, при котором происходит отрыв материала преграды от сферической хрупкой частицы медного шлака.

Используя выражения, определим напряжения в сферической хрупкой частице медного шлака:

$$\begin{cases} \sigma_{rr} = \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \theta^2}, \\ \sigma_{\theta\theta} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2}, \\ \sigma_{r\theta} = -\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} \right). \end{cases}$$

Функция $\Phi(r, \theta)$ выбирается таким образом, чтобы:

$$\nabla^2 \nabla^2 \Phi(r, \theta) = 0$$

где $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}$ - гармонический оператор Лапласа в полярных координатах.

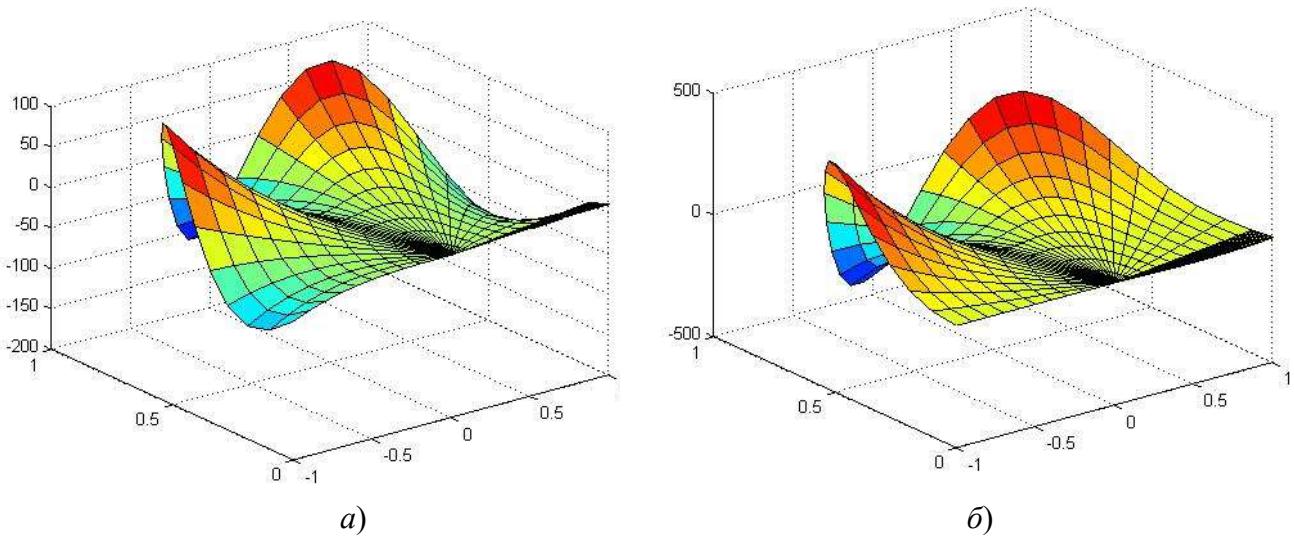
Опуская математические преобразования, получим:

$$\begin{cases} \sigma_{rr} = 2E_1 r \cos \theta - 6E_2 r \cos 3\theta + 2E_3 r \sin \theta - 6E_4 r \sin 3\theta - \\ - 4F_1 r^3 \cos 3\theta - 20F_2 r^3 \cos 5\theta - 4F_3 r^3 \sin 3\theta - 20F_4 r^3 \sin 5\theta + \\ + \frac{3+\mu}{8} \gamma \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 (a_0^2 - r^2) \\ \sigma_{\theta\theta} = 6E_1 r \cos \theta + 6E_2 r \cos 3\theta + 6E_3 r \sin \theta + 6E_4 r \sin 3\theta + \\ + 20F_1 r^3 \cos 3\theta + 20F_2 r^3 \cos 5\theta + 20F_3 r^3 \sin 3\theta + 20F_4 r^3 \sin 5\theta + \sigma_{\theta\theta} + \\ + \gamma \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 \left[\frac{3+\mu}{8} a_0^2 - \frac{1-3\mu}{8} r^2 \right] \\ \sigma_{r\theta} = 2E_1 r \sin \theta + 6E_2 r \sin 3\theta - 2E_3 r \cos \theta - 6E_4 r \cos 3\theta + \\ + 12F_1 r^3 \sin 3\theta + 20F_2 r^3 \sin 5\theta - 12F_3 r^3 \cos 3\theta - 20F_4 r^3 \cos 5\theta \end{cases}$$

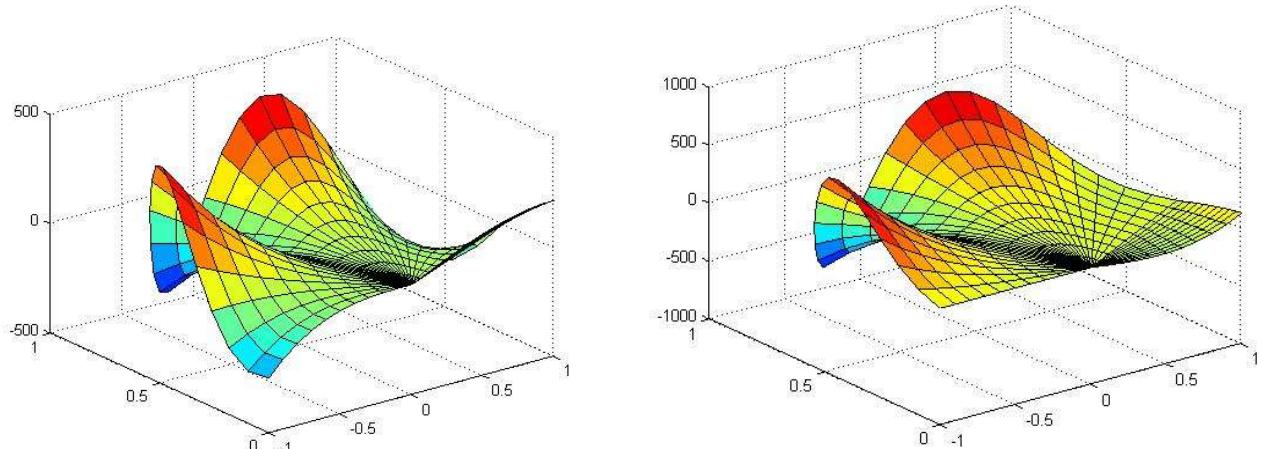
Уравнения закона Гука в ортогональных криволинейных координатах имеют такой же вид, что и в декартовых координатах. Поэтому для случая плоского напряженного состояния имеем:

$$\begin{cases} \varepsilon_{rr} = \frac{1}{E}(\sigma_{rr} - \nu\sigma_{\theta\theta}) \\ \varepsilon_{\theta\theta} = \frac{1}{E}(\sigma_{\theta\theta} - \nu\sigma_{rr}) \\ \varepsilon_{r\theta} = \frac{1+\nu}{E}\sigma_{r\theta} \end{cases}$$

Предложенная методика расчета напряженно деформированного состояния сферической частицы медного шлака, позволило получить зависимости его разрушения от динамики и кинематики ударного взаимодействия с ударной лопастью дезинтегратора, справедливой для любого момента времени (рисунок 3, 4).



*Рисунок 3 – Зависимость напряжений на поверхности проникающей в преграду частицы медного шлака при скорости взаимодействия 50 м/с и угле падения 5°:
а – растягивающие напряжения σ_{rr} , б – угловые напряжения $\sigma_{\theta\theta}$*



*Рисунок 4 – Зависимость напряжений на поверхности проникающей в преграду частицы медного шлака при скорости взаимодействия 120 м/с и угле падения 20°:
а – растягивающие напряжения σ_{rr} , б – угловые напряжения $\sigma_{\theta\theta}$*

Заключение.

В статье представлена теоретическая модель селективного разрушения частицы медного шлака, с учетом условий трансформации внешних воздействий во внутренние напряжения. Главной особенностью модели является использование минимального числа определяющих параметров, оказывающих наиболее сильное влияние на процесс разрушения частицы медного шлака от режимов ударного взаимодействия. Выбор небольшого числа характерных для данной задачи параметров, определяющих в основном процесс

высокоскоростного взаимодействия тел, будет весьма полезным при создании рациональной методики численного эксперимента.

На основе проведенного моделирования определен наибольший уровень растягивающих σ_{rr} и угловых напряжений $\sigma_{\theta\theta}$ от 100 до 500 МПа на поверхности частицы медного шлака, который определяет возможность разрушения структуры частицы. Предполагается, что абразив за это время накапливает такие изменения, которые могут привести к откольному разрушению и постепенной потере цельности, вплоть до полного распада. Так как медный шлак состоит главным образом из силикатной фазы с явными включениями медноносного пирротина, его разрушение будет протекать по границам их раздела. Размер оливиновый фазы варьируется от 50 до 300 мкм, рудной до 350 мкм, аморфной до 400 мкм.

Исследование выполнено в рамках проекта РНФ № 25-19-00811.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang J. (2007). Predictive depth of jet penetration models for abrasive waterjet cutting of alumina ceramics. International Journal of Mechanical Sciences, 49(3), 306-316.
2. Schüler M., Day R., Bergs T. Benchmark of abrasives for different applications // 2022 WJTA Conference and Expo. November 2-3. New Orleans, Louisiana.
3. Барсуков Г.В., Журавлева Т.А., Кожус О.Г., Селеменева Е.М., Прасолов Е.А. Изучение влияния морфологии абразивных частиц медного шлака на скорость и глубину гидроабразивного резания для создания нового абразива повышенной прочности // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии: научно-технический журнал. – Орел: Изд-во ОГУ им. И.С. Тургенева, 2022, № 1 (351). - С. 86-93.
4. Барсуков Г.В., Журавлева Т.А., Бармина О.В. и др. Влияние параметров химико-термической обработки частиц медного шлака на качество гидроабразивного резания // Проблемы машиностроения и автоматизации: научно-технический журнал. – Москва: Изд-во Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 2022, №4. – С. 22- 30.
5. Колодежная Е.В. Разработка технологии селективной дезинтеграции металлургических шлаков с использованием аппаратов центробежно-ударного дробления: автореферат дис. ... кандидата технических наук : 25.00.13 / Колодежная Екатерина Владимировна; [Место защиты: Магнитогорск, 2009. - 18 с.
6. Хопунов Э.А. Селективное разрушение минерального и техногенного сырья (в обогащении и металлургии). – Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2013. – 429 с.
7. Победря Б.Е. Основы механики сплошной среды. Курс лекций / Победря Б.Е., Георгиевский Д.В. - Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 272 с.

Барсуков Геннадий Валерьевич

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева,
доктор технических наук,
профессор кафедры машиностроения
г. Орёл ул. Московская д. 34
Тел: +79038806976
E-mail: 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: sidorov.35mz@mail.ru

Власов Виктор Викторович

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева,
кандидат технических наук,
Научный сотрудник НИЛ «НАМ»
г. Орёл ул. Наугорское ш. 29
Тел: +79038806976
E-mail: info@oreluniver.ru

Кожус Ольга Геннадьевна

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

Баранов Юрий Николаевич

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева,
доктор технических наук, профессор кафедры
автоматизированных систем управления и
кибернетики. Орёл Наугорское ш., 29
Тел: 8-920-801-9718
E-mail: bar20062@yandex.ru

Прасолов Егор Александрович

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

BARSUKOV G.V., KOZHUS O.G., ZHURAVLEVA T.A.,
BARANOV Yu.N., VLASOV V.V., PRASOLOV E.A.

MODELING THE CONDITIONS OF COPPER SLAG PARTICLE OPENING UNDER IMPACT FOR USE IN WATER-JET CUTTING

Annotation. The authors of the article have developed a theoretical model of selective destruction of copper slag particles, taking into account the conditions of transformation of external effects into internal stresses. The main feature of the model is the use of a minimum number of determining parameters that have the strongest influence on the process of destruction of copper slag particles from impact interaction modes. The choice of a small number of parameters characteristic of this problem, mainly determining the process of high-speed interaction of bodies, will be very useful in creating a rational methodology for a numerical experiment.

Keywords: modeling, abrasive, copper slag, waterjet cutting, selective destruction, disintegrator

BIBLIOGRAPHY

1. Wang J. (2007). Predictive depth of jet penetration models for abrasive waterjet cutting of alumina ceramics. International Journal of Mechanical Sciences, 49(3), 306-316.
2. Schüler M., Day R., Bergs T. Benchmark of abrasives for different applications // 2022 WJTA Conference and Expo. November 2-3. New Orleans, Louisiana.
3. Barsukov G.V., Zhuravleva T.A., Kozhus O.G., Selemeneva E.M., Prasolov E.A. Study of the influence of the morphology of copper slag abrasive particles on the speed and depth of waterjet cutting to create a new high-strength abrasive // Fundamental and applied problems of engineering and technology: scientific and technical journal. - Orel: Publishing house of OSU im. Turgeneva, 2022, No. 1 (351). - P. 86-93.
4. Barsukov G.V., Zhuravleva T.A., Barmina O.V. et al. Influence of parameters of chemical-thermal treatment of copper slag particles on the quality of waterjet cutting // Problems of mechanical engineering and automation: scientific and technical journal. - Moscow: Publishing house of the A.A. Blagonravov Institute of Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences, 2022, No. 4. - P. 22-30.
5. Kolodezhnaya E.V. Development of technology for selective disintegration of metallurgical slags using centrifugal impact crushing devices: abstract of dis. ... candidate of technical sciences: 25.00.13 / Kolodezhnaya E.V.; [Place of protection: Magnitogorsk state tech. [Un-t im. G.I. Nosov]. - Magnitogorsk, 2009. - 18 p.
6. Khopunov E.A. Selective destruction of mineral and technogenic raw materials (in enrichment and metallurgy). - Ekaterinburg: OOO "UIPC", 2013. - 429 p.
7. Pobedrya B.E. Fundamentals of continuum mechanics. Lecture course / Pobedrya B.E., Georgievskiy D.V. - Moscow: FIZMATLIT, 2006. - 272 p.

Barsukov Gennady Valeryevich

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

Kozhus Olga Gennadievna

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

Zhuravleva Tatiana Alexandrovna

Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical
University
Candidate of Technical Sciences
Kaluga, Bazhenova str., 2.
Тел.: + 7 (4862) 413295
E-mail: sidorov.35mz@mail.ru

Baranov Yuri Nikolaevich

Oryol State University named after I.S. Turgenev,
Doctor of Technical Sciences,
Professor of the Department of Automated Control
Systems and Cybernetics.
Oryol, Naugorskoe sh., 29
Тел: 8-920-801-9718
E-mail: bar20062@yandex.ru

Vlasov Viktor Viktorovich

Oryol State University
named after I.S. Turgenev,
Candidate of Technical Sciences,
Researcher of the Research Laboratory "NAM"
Oryol, Naugorskoe Highway 29
Tel: +79038806976
E-mail: nfo@oreluniver.ru

Prasolov Egor Alexandrovich

Oryol State University
named after I.S. Turgenev,
postgraduate student of the Department of Mechanical
Engineering
Orel, Moskovskaya str., 34
Тел: +79038806976
E-mail: prasolovegor@mail.ru

КОРЯЖКИН А.А., КРЫЛОВ И.В., ДРУЖКОВ С.С.

ПРИМЕНЕНИЕ ИНСТРУМЕНТА ИЗ РЕЖУЩЕЙ КЕРАМИКИ В ПРОЦЕССАХ ФРЕЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ГТД

Аннотация. Определена актуальность решения задачи повышения производительности механической обработки деталей газотурбинных двигателей из жаропрочных сплавов за счёт применения керамического режущего инструмента. Приведены результаты сравнительных испытаний по фрезерованию жаропрочных сплавов ХН78Т и ЭП718ид. Рассмотрены перспективы замещения зарубежного фрезерного керамического инструмента соответствующим отечественным аналогом.

Ключевые слова: жаропрочный сплав, фрезерование, режущая керамика, производительность механической обработки.

Введение

Современные тенденции развития авиадвигателестроения предполагают применение конструкционных материалов, характеризующихся высокими физико-механическими характеристиками, определяющими их функциональные способности. При проектировании газотурбинных двигателей (ГТД) широкое применение находят материалы, детали из которых работают в условиях высоких температур и возникающих при этом статических и динамических нагрузок. Способность материалов сохранять свои физико-механические характеристики в данных условиях обеспечивается за счёт добавления в их состав специальных легирующих элементов, которые способствуют улучшению конструкционных показателей материалов, однако вместе с тем ухудшают их технологические свойства, а именно обрабатываемость резанием. К примеру, при токарной обработке с использованием твердосплавного инструмента скорость резания для материала Сталь 45 составляет приблизительно 200...250 м/мин, а для сплава ЖС6 достигает лишь 10...15 м/мин [1]. В условиях современного авиадвигателестроения по причине постоянного повышения рабочих температур происходит непрерывное увеличение доли конструктивных элементов двигателя, изготовленных из жаропрочных сплавов. Поскольку номенклатура деталей горячей части ГТД достаточно широка, повышение эффективности обработки данных сплавов представляет собой актуальную задачу, решение которой требует от производителей ГТД постоянно осуществлять поиск технологических способов совершенствования процессов механической обработки.

Согласно результатам анализа отечественной и зарубежной практики металлообработки, значительное повышение производительности процессов резания жаропрочных сплавов достигается за счёт реализации высокоскоростной обработки, где находит применение металлорежущий инструмент, оснащённый режущей керамикой (РК). Значительное повышение производительности обработки при использовании керамического режущего инструмента (в сравнении с традиционным инструментом из твёрдого сплава) обеспечивается благодаря комплексу таких свойств РК, как высокая твердость (до 95 HRA), повышенная теплостойкость (до 1400°C) и износостойкость. Например, по результатам исследований [2], при токарной обработке заготовок для детали типа «Корпус» из жаропрочного сплава Inconel 718 (аналог ЭП718ид, ХН45МВТЮБРид) за счёт применения инструмента с вставками рабочей части из РК была достигнута скорость резания 220 м/мин, что в 11 раз перевесило скорость обработки инструментом из твёрдого сплава. Однако, преимущества РК перед твёрдосплавным инструментом сопровождаются такими недостатками, как высокая хрупкость и пониженная изгибная прочность, что обусловлено спецификой структуры керамического материала. Поэтому при составлении технологии обработки необходимо проводить выбор марки инструментального материала с учётом конкретных технологических условий, что позволит достичь максимальной износостойкости инструмента без разрушения в процессе работы.

Основная часть

В рамках данных исследований проводились стойкостные испытания, направленные на установление эффективности применения инструмента из режущей керамики в процессах фрезерной обработки деталей ГТД, изготавливаемых из жаропрочных сплавов. Для выполнения экспериментальных работ использовался вертикально-фрезерный обрабатывающий центр модели UCP-710 (рисунок 1) с применением в качестве инструмента специально разработанной фрезы SPM-00001K с цилиндрическим твёрдосплавным хвостовиком Ø8 мм и напайной керамической рабочей частью Ø10 мм (рисунок 2), а также для сопоставления стандартной монолитной твёрдосплавной фрезы M182-100100F02 H24 (Ø10 мм, сплав VHS11 с покрытием AlTiN). Первая серия опытов состояла в обработке опытной заготовки из жаропрочного сплава XH78T. Испытания проводились на предмет наработки инструмента до наступления критического износа либо разрушения. Результаты испытаний представлены в таблице 1.



Рисунок 1 – Общий вид станка UCP-710 и его рабочей зоны



Рисунок 2 – Фреза SPM-00001K

Таблица 1 – Результаты первой серии опытов

Наименование режущего инструмента	Инструментальная оснастка	Режимы резания							T, мин	Износ, мм
		n, об/мин	V, м/мин	S _m , мм/м	S _z , мм/зуб	a _e , мм	a _p , мм			
Фреза M182-100100F02 H24 D10 Z4 (АО «НИР»)	Патрон NIKKEN HSK 63A C12-906. Вылет фрезы из патрона 34 мм.	1200	37,7	240	0,05	7	1	74	0,5 (выкрашивания)	
Фреза SPM-00001K D10 Z4 (АО «НИР»)	Патрон NIKKEN HSK 63A C12-906. Вылет фрезы из патрона 34 мм.	12000	377	960	0,02	7	1	46	Поломка фрезы	

Согласно результатам испытаний, при обработке заготовки из жаропрочного сплава на никелевой основе ХН78Т, керамическая фреза SPM-00001K отработала 46 минут. На 18 минуте поверхность режущей части фрезы начала проявлять цвета побежалости и возникло налипание материала заготовки. На 47 минуте произошла поломка фрезы в двух местах:

1. в зоне соединения хвостовика с режущей частью;
2. по режущей части фрезы на расстоянии ≈ 4 мм от торца (часть фрезы осталась в заготовке, рисунок 3).

По завершению обработки на поверхности заготовки были обнаружены прижоги и светлые пятна (зоны отвода тепла в приспособление).



Рисунок 3 – Вид заготовки (слева) и керамического инструмента (справа) после обработки в первой серии опытов (пунктиром обозначены зоны разрушений)



Рисунок 4 – Вид заготовки (слева) и твёрдосплавного инструмента (справа) после обработки в первой серии опытов

При оценке эффективности металлообработки на предварительных операциях, когда к точности и качеству обработанной поверхности не предъявляются строгие требования, определяющим фактором является производительность процесса резания, которая характеризуется скоростью удаления материала [3]:

$$Q = \frac{a_p \cdot a_e \cdot Sm}{1000}, \quad (1)$$

где Q – скорость удаления материала, $\text{см}^3/\text{мин}$;

a_p – глубина резания, мм ;

a_e – ширина резания, мм ;

Sm – скорость подачи, $\text{мм}/\text{мин}$.

Время обработки фрезой из режущей керамики составило 46 минут. С учётом режимов резания скорость удаления материала:

$$Q_K = \frac{1 \cdot 7 \cdot 960}{1000} = 6,72 \text{ см}^3/\text{мин.}$$

Твёрдосплавная фреза отработала без разрушения до наступления критического износа режущей кромки с проявлением выкрашиваний (рисунок 4). При этом зафиксирован период стойкости 74 минуты и скорость удаления материала

$$Q_{TC} = \frac{1 \cdot 7 \cdot 240}{1000} = 1,68 \text{ см}^3/\text{мин.}$$

Полученные результаты свидетельствуют о достижении четырёхкратного повышения производительности обработки за счёт применения керамического инструмента взамен твёрдосплавного при обработке жаропрочного сплава XH78T. Несмотря на уменьшение времени стойкости инструмента на 38%, его применение в технологических процессах (ТП) обработки жаропрочных сплавов весьма целесообразно.

Вторая серия опытов состояла в сравнительных испытаниях керамических фрез отечественного и импортного производства при обработке детали «Кронштейн» (рисунок 5) из материала ЭП718ид (таблица 2) на станке UCP-710. В процессе испытаний производилось предварительное фрезерование карманов на детали без использования охлаждения (таблица 3).

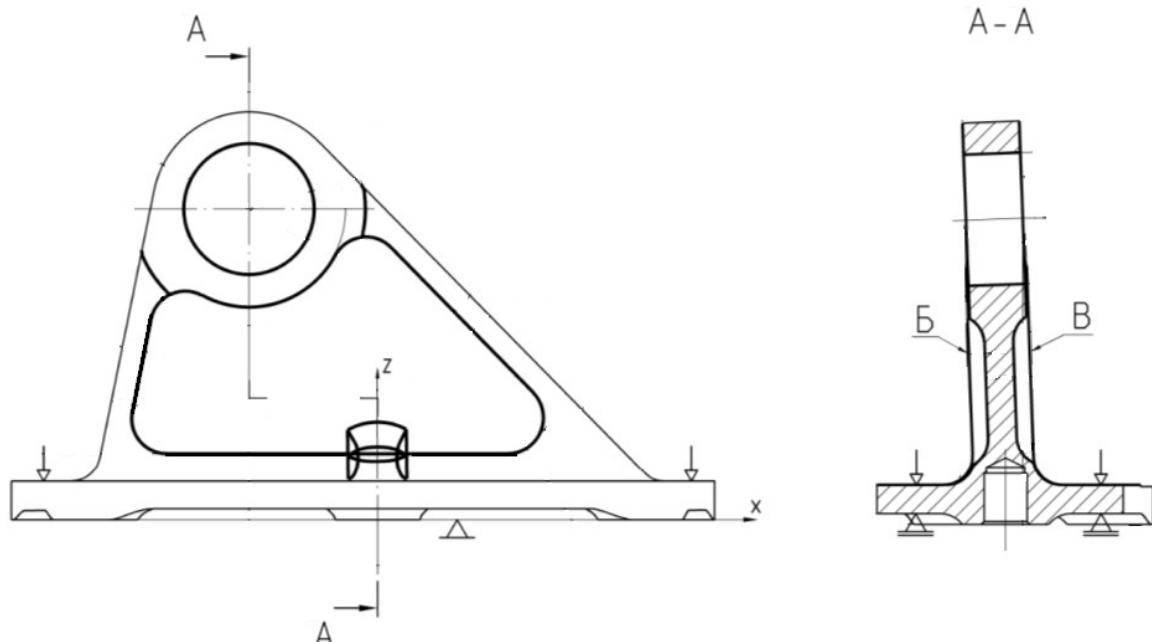


Рисунок 5 – Эскиз детали «Кронштейн» из материала ЭП718ид
(обрабатываемые элементы «Б» и «В»)

Таблица 2 – Характеристики сплава ЭП718ид [4]

Механические свойства материала при $t = 20^\circ\text{C}$						Длительная прочность, ч, (при $t = 600^\circ\text{C}$, $\sigma = 785 \text{ МПа}$)
Временное сопротивление разрыву σ_b , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение, ψ , %	Ударная вязкость KCU , Дж/см ²	Твёрдость НВ	
≤ 1130	≤ 685	≤ 12	≤ 14	≤ 34	≤ 363	≤ 60

Критерием эффективности металлообработки в данном случае являлось количество конструктивных элементов (карманов на детали), обработанных инструментом до наступления критического износа режущей кромки, либо поломки. В качестве объекта испытаний рассматривалась фреза 150018326 D10 Z4 (ф. «GUT»), используемая в качестве основного инструмента согласно ТП обработки детали «Кронштейн», и вышеупомянутая экспериментальная фреза SPM-00001К отечественного производства (АО «НИР»), принятая в качестве аналога. Режимы обработки сравнительных испытаний соответствовали установленным ранее по управляющей программе. Согласно полученным результатам, применяемый по технологии металлорежущий инструмент – фреза 150018326 D10 Z4 (ф.

«GUT») обработала 5 карманов (2,5 детали) до наступления критического состояния (абразивный износ, сколы и выкрашивания размером до 1,5 мм). Затем при прочих равных условиях обработка была выполнена с применением отечественной керамической фрезы SPM-00001K (АО «НИР»), до наступления критического состояния обработано 4 кармана на детали «Кронштейн».

Таблица 3 – Результаты второй серии опытов

Наименование режущего инструмента	Инструментальная оснастка	Режимы резания						Количество обработанных элементов (деталей) одной фрезой/износ, мм
		n, об/мин	V, м/мин	S_m, мм/мин	S_Z, мм/зуб	z_e, мм	a_p, мм	
Фреза согласно ТП 150018326 D10 Z4 (ф. «GUT»)	Патрон 206406 (ф. SCHUNK), цанга 0207927 (ф. SCHUNK), Вылет фрезы из патрона 38 мм.	12000	377	960	0,02	7	1	5 (2,5)/1,5 (сколы, выкрашивания)
Фреза SPM-00001K D10 Z4 (АО «НИР»)	Патрон 206406 (ф. SCHUNK), цанга 0207927 (ф. SCHUNK), Вылет фрезы из патрона 38 мм.	12000	377	960	0,02	7	1	4 (2)/1,5 (сколы, выкрашивания)

Таким образом, фреза SPM-00001K в сравнении с импортным инструментом показала на 20% меньшую эффективность, что может быть обусловлено особенностями применяемого инструментального материала, а также недостаточной полнотой оптимизации геометрических параметров фрез в условиях конкретной области применения. Однако, с учётом пониженной себестоимости и доступности отечественного инструмента на современном рынке, керамические инструменты производства АО «НИР» способны быть альтернативой соответствующему инструменту зарубежного производителя.

Заключение

Достигнуто четырёхкратное повышение производительности механической обработки с применением фрез из режущей керамики в сравнении с твёрдосплавным инструментом при обработке жаропрочного сплава на никелевой основе XH78T. Несмотря на уменьшение времени стойкости инструмента из режущей керамики при работе на режимах высокоскоростного фрезерования, его применение в технологических процессах обработки деталей из жаропрочных сплавов экономически целесообразно.

Сравнительные испытания фрез с использованием режущей керамики и зарубежных аналогов показали сопоставимые результаты по износстойкости при обработке деталей из жаропрочного сплава ЭП718ид. С учётом пониженной себестоимости и доступности на рынке керамические инструменты производства АО «НИР» способны быть альтернативой соответствующему инструменту зарубежного производителя.

Для эффективного применения высокоскоростной фрезерной обработки деталей из жаропрочных сплавов (а также других труднообрабатываемых материалов) инструментом из режущей керамики необходимо проводить разработку методики подбора инструментального материала и оптимизации режимов резания с учётом технологических условий процесса обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Коряжкин, А. А. Повышение эффективности токарной обработки керамическим инструментом криволинейных поверхностей деталей из жаропрочных сплавов / А. А. Коряжкин, С. С. Тарасов // СТИН. – 2013. – №8. – С.23-27.

2. Волков, Д. И. Применение высокоскоростной токарной обработки при изготовлении деталей из жаропрочных никелевых сплавов / Д. И. Волков, С. Л. Проскуряков, С. С. Тарасов // Вестник РГАТА имени П. А. Соловьева. – 2012. – № 2 (23). – С. 134 - 138.
3. Панов, А. А. Обработка металлов резанием: Справочник технолога / А. А. Панов, В. В. Анин, Н. Г. Бойм и др.; 2-е изд., перераб. и доп. // М: Машиностроение, 2004. – 784 с.
4. Драгунов, Ю. Г. Марочник сталей и сплавов. 4-е изд., перераб. и доп. / Ю. Г. Драгунов, А. С. Зубченко, Ю. В. Каширский и др. // М.: Издательство «Инновационное машиностроение», 2014. – 1216 с.

Коряжкин Андрей Александрович

АО «Новые инструментальные решения», г. Рыбинск
Генеральный директор, доктор технических наук
152903, Россия, Ярославская область, г. Рыбинск,
ул. Авиационная, 1
E-mail: koryazhkin.andrey@zao-nir.com

Крылов Илья Владимирович

АО «Новые инструментальные решения», г. Рыбинск
Технический директор, кандидат технических наук
152903, Россия, Ярославская область, г. Рыбинск, ул.
Авиационная, 1
E-mail: Krylov.Ilya@zao-nir.com

Дружков Станислав Сергеевич

АО «Новые инструментальные решения», г. Рыбинск
Ведущий специалист, кандидат технических наук
152903, Россия, Ярославская область, г. Рыбинск,
ул. Авиационная, 1
E-mail: druzhkov.stanislav@zao-nir.com

KORYAZHKIN A.A., KRYLOV I.V., DRUZHKOVS S.S.

THE USE OF CUTTING CERAMIC TOOLS IN THE MILLING OF GTE PARTS

Abstract. *The relevance of solving the problem of increasing the productivity of machining parts of gas turbine engines made of heat-resistant alloys through the use of ceramic cutting tools has been determined. The results of comparative tests on milling of heat-resistant CrN78T and EP718id alloys are presented. The prospects of replacing a foreign milling ceramic tool with a corresponding domestic analogue are considered.*

Keywords: *heat-resistant alloy, milling, cutting ceramics, machining performance.*

BIBLIOGRAPHY

1. Koryazhkin, A. A. Improving the efficiency of turning curved surfaces of parts made of heat-resistant alloys with ceramic tools / A. A. Koryazhkin, S. S. Tarasov // Moscow: STIN. 2013. No. 8. Pp.23-27.
2. Volkov, D. I. The use of high-speed turning in the manufacture of parts made of heat-resistant nickel alloys / D. I. Volkov, S. L. Proskuryakov, S. S. Tarasov // Rybinsk: Bulletin of the Rybinsk State Aviation Technical University named by P.A. Solovyov. 2012. № 2 (23). Pp. 134-138.
3. Panov, A. A. Metalworking by cutting: A technologists handbook / A. A. Panov, V. V. Anikin, N. G. Boym et al.; 2nd ed., reprint. and add. // Moscow: Mashinostroenie, 2004. 784 p.
4. Dragunov, Yu. G. Vintage of steels and alloys. 4th ed., revised and additional materials / Yu. G. Dragunov, A. S. Zubchenko, Yu. V. Kashirsky and others // Moscow: Publishing House "Innovative Engineering", 2014. 1216 p.

Koryazhkin Andrey Alexandrovich

JSC "New instrumental solutions", Rybinsk
General Director, Doctor of Technical Sciences
Aviationsnaya str., 1, Rybinsk, Yaroslavl region, 152903,
Russia
E-mail: Koryazhkin.Andrey@zao-nir.com

Krylov Ilya Vladimirovich

JSC "New instrumental solutions", Rybinsk
Technical Director, Candidate of Technical Sciences
Aviationsnaya str., 1, Rybinsk, Yaroslavl region, 152903,
Russia
E-mail: Krylov.Ilya@zao-nir.com

Druzhkov Stanislav Sergeevich

JSC "New instrumental solutions", Rybinsk
Leading specialist, Candidate of Technical Sciences
Aviationsnaya str., 1, Rybinsk, Yaroslavl region, 152903,
Russia
E-mail: Druzhkov.Stanislav@zao-nir.com

© Коряжкин А.А., Крылов И.В., Дружков С.С., 2025

МАШИНОВЕДЕНИЕ И МЕХАТРОНИКА

УДК 004.932.2, 004.021

DOI: 10.33979/2073-7408-2025-373-5-39-59

НЕЧАЕВ А.А., ПОЛЯКОВ Р.Н.

ОБЗОР МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ. ЧАСТЬ 1

Аннотация. В статье приведён обзор задачи обнаружения (детектирования) объектов на изображении. Рассмотрено несколько вариантов постановки задачи, классификация методов её решения (на определённые группы), описаны основные существующие методы решения. Рассмотрены достоинства и недостатки различным методов, приведено сравнение различных подходов, выделены их достоинства и недостатки. В статье рассмотрено развитие методов детектирования объектов за последние приблизительно сорок лет. Описаны основные идеи работы как нейронных сетей в целом, так и свёрточных нейронных сетей в частности (так как наибольшей производительности в детектировании объектов достигли именно те методы, которые используют свёрточные нейронные сети). Кратко рассмотрена задача отслеживания (или трекинга) объектов, указаны некоторые практические случаи, в которых задачи детектирования или трекинга объектов могут возникать. Статья публикуется в двух частях.

Ключевые слова: цифровая обработка изображений, детектирование объектов, обнаружение объектов, трекинг объектов.

Введение

Обнаружение объектов (определение объектов, детектирование объектов, object detection) используется во многих приложениях, наиболее популярными из которых являются: взаимодействие человека с компьютером (human-computer interaction, HCI), робототехника (например, сервисные роботы), бытовая электроника (например, смартфоны), безопасность (например, распознавание, отслеживание), поиск (например, поисковые системы, управление фотографиями) и транспорт (например, автономное вождение и помощь водителю при вождении) [1]. Во многих системах компьютерного зрения обнаружение объектов является первой выполняемой задачей, поскольку это позволяет получить дополнительную информацию об обнаруженном объекте и месте [1]. В автономном вождении задача обнаружения объектов заключается в точной и эффективной идентификации и локализации большого количества предопределенных классов экземпляров объектов (транспортных средств, пешеходов, дорожных знаков и т. д.) на видеозаписях дорог. В робототехнике промышленный робот должен распознавать определенные элементы машины. В сфере безопасности камера должна точно распознавать каждое лицо человека [2]. Помимо этого, детектирование объектов (в частности, алгоритм YOLO, You Only Look Once) используется для обнаружения различных типов животных в лесах (wildlife). Этот тип обнаружения используется егерями и журналистами для идентификации животных на видео (как записанных, так и в реальном времени) и изображениях. Некоторые из животных, которых можно обнаружить, включают жирафов, слонов и медведей [3].

Ещё одной важной задачей является удержание объекта в фокусе (отслеживание объекта, трекинг объекта или object tracking). Использование отслеживания объектов (object tracking) актуально в таких задачах, как [4]:

- распознавание на основе движения, то есть идентификация человека по походке, автоматическое обнаружение объектов и т. д.;
- автоматизированное наблюдение, то есть мониторинг места для обнаружения подозрительных действий или маловероятных событий;
- видеоиндексирование, то есть автоматическое аннотирование и поиск видео в мультимедийных базах данных;

- взаимодействие человека с компьютером, то есть распознавание жестов, отслеживание взгляда для ввода данных в компьютеры и т. д.;
- мониторинг дорожного движения, то есть сбор статистики дорожного движения в режиме реального времени для управления транспортным потоком;
- навигация транспортного средства, то есть планирование пути на основе видео и возможностей обхода препятствий.

В этой статье рассматриваются постановка задачи (детектирования и трекинга объектов), классификация методов детектирования объектов и те методы детектирования, которые не используют глубокое обучение.

Основная часть

Постановка задачи

Сначала необходимо сформулировать задачи определения объекта и удержания объекта в фокусе, после этого можно будет переходить к обзору существующих методов их решения. В разных источниках приводятся схожие между собой, но не всегда в точности совпадающие формулировки каждой из этих задач, поэтому приведём формулировки из нескольких источников.

Постановка задачи обнаружения объектов заключается в определении того, где на данном изображении расположены объекты (локализация объектов) и к какой категории относится каждый объект (классификация объектов) [5]. Обнаружение объектов (*object detection*) – это задача определения позиции и категории множественных объектов в изображении. Формально модель обнаружения объектов может рассматриваться как функция, которая принимает на вход изображение I и возвращает список обнаружений $D = [d_1, \dots, d_N]$, где каждое обнаружение d_i представляется тройкой $d_i = [b_i, c_i, s_i]$, которая состоит из: ограничивающей коробки (*bounding box*) b_i , соответствующей категории c_i и соответствующей оценки уверенности (*confidence score*) s_i [6].

Отслеживание объекта – это определение траектории, по которой объект движется внутри изображения, которая аппроксимируется по мере его перехода от сцены к сцене [7]. Целью отслеживания (трекинга) является оценка состояний целевого объекта в последующих кадрах, учитывая начальное состояние (например, положение и размер) целевого объекта в кадре видео [8]. Отслеживание – это задача оценки траектории или пути объекта в плоскости изображения при его перемещении по сцене [9]. Формально модель отслеживания объектов можно определить, используя в качестве базы определение из источника [6] для модели обнаружения (детектирования) объекта. Модель отслеживания объектов может рассматриваться как функция, которая принимает на вход последовательность изображений $I = \{I_1, \dots, I_L\}$ (где каждое изображение – это один кадр видео, которое всего содержит L кадров) и результат обнаружения всех представляющих интерес объектов для первого кадра I_1 (то есть начальная информация, которую модель получает, решая задачу обнаружения объектов), затем для каждого кадра возвращает список обнаружений $D_k = [d_{k1}, \dots, d_{kN}]$, где $k = 2, \dots, L$, каждое обнаружение d_{ki} представляется тройкой $d_{ki} = [b_{ki}, c_{ki}, s_{ki}]$, которая состоит из: ограничивающей коробки (*bounding box*) объекта номер i в кадре номер k b_{ki} , соответствующей категории (к которой модель отнесла объект номер i в кадре номер k) c_{ki} и соответствующей оценки уверенности (*confidence score*) s_{ki} (данная моделью вероятность того, что объект номер i в кадре номер k принадлежит именно к категории c_{ki}).

Существующие методы автоматического определения (детектирования) объекта

Классификация методов детектирования объекта на изображении

Прогресс в детектировании объектов на изображении обычно принято делить на два исторических (хронологических) периода [10]. Первый период – это время до 2014 года. Этот период принято называть “периодом традиционного детектирования объектов” (*traditional object detection period*) [10]. Этот период характеризуется развитием в основном тех методов детектирования объектов, которые не используют глубокое обучение (*deep learning*). Примерами таких методов являются: корреляционный анализ, выделение ключевых (особых) точек, детектор Виолы Джонса, детектор гистограммы направленных градиентов (HOG,

Histogram of Oriented Gradients), модель на основе деформируемых деталей (DPM, Deformable Part-based Model).

В 2012 году была предложена глубокая свёрточная нейросеть AlexNet, которая описана в [11]. Эта нейросеть имеет 6×10^7 параметров, 6.5×10^5 нейронов, состоит из 5 свёрточных слоёв и 3 полносвязных слоёв. В некоторых источниках считается, что эта работа (представившая нейросеть AlexNet, возможно совместно с некоторыми другими работами) является перерождением (буквально, rebirth) свёрточных нейронных сетей [10, 12, 13, 14]. Через примерно 2 года после выхода нейросети AlexNet (то есть в 2014 году) начался второй период в развитии детектирования объектов на изображении. Его принято называть “периодом детектирования, основанного на глубоком обучении” (deep learning based detection period) [10]. Перед разбором некоторых методов детектирования объектов на изображении, использующих глубокое обучение, необходимо дать определения и пояснения самих понятий “глубокое обучение” (deep learning), “нейронная сеть” (neural network) и “свёрточная нейронная сеть” (convolutional neural network, CNN).

Глубокое обучение – это особый вид обучения с глубокими искусственными нейронными сетями, хотя сегодня глубокое обучение и искусственные нейронные сети считаются одной и той же областью. Искусственные нейронные сети – это подраздел машинного обучения, которое, в свою очередь, является подразделом как статистики, так и искусственного интеллекта (ИИ). При этом искусственные нейронные сети гораздо более популярны в искусственном интеллекте, чем в статистике [15]. Глубокое обучение исторически относится к более крупной области статистического машинного обучения, поскольку оно в основном касается методов, которые способны изучать представления из данных. Используемые методы изначально исходят из искусственных нейронных сетей, а уточнение «глубокое» подчеркивает, что модели представляют собой длинные композиции отображений, которые, как теперь известно, достигают большей производительности [16]. Глубокое обучение – это подраздел машинного обучения, занимающийся алгоритмами, математическими функциями и искусственными нейронными сетями. Глубокое обучение – это область искусственного интеллекта (ИИ), целью которой является внедрение функций человеческого мозга в машины для обработки данных [17].

В общем случае нейронную сеть N можно рассматривать как машину, способную принимать ряд «состояний», каждое из которых представляет собой функцию, вычислимую машиной. Эти функции отображают из входного пространства X (множества всех возможных шаблонов) в выходное пространство Y . Для нейронных сетей входные данные обычно кодируются как векторы действительных чисел (поэтому $X \subseteq \mathbb{R}^n$ для некоторого n), и эти действительные числа часто лежат в ограниченном диапазоне. Если нейронная сеть используется для задачи бинарной классификации, то для неё $Y = \{0,1\}$. Выходы нейронной сети могут быть и действительными числами (real). Более математически формально, нейронную сеть можно рассматривать как характеризуемую множеством состояний Ω , множеством входов X , множеством выходов Y и параметризованной функцией $F: \Omega \times X \rightarrow Y$. Для любого $\omega \in \Omega$ функция, представленная состоянием ω , это $h_\omega: X \rightarrow Y$, заданная как $h_\omega(x) = F(\omega, x)$. Функция F описывает функциональность нейронной сети: когда нейросеть находится в состоянии ω , она вычисляет функцию h_ω [18].

В самом общем виде нейронная сеть – это машина, которая разработана для моделирования способа, которым мозг выполняет определенную задачу или функцию, представляющую интерес; сеть обычно реализуется с использованием электронных компонентов или моделируется в программном обеспечении на цифровом компьютере. Для достижения хорошей производительности нейронные сети используют массивную взаимосвязь простых вычислительных ячеек, называемых «нейронами» или «процессорными блоками». Таким образом, мы можем предложить следующее определение нейронной сети, рассматриваемой как адаптивная машина. Нейронная сеть – это массивно-параллельный распределенный процессор, состоящий из простых процессорных блоков, который имеет естественную склонность к хранению экспериментальных знаний и предоставлению их для использования. Она напоминает мозг в двух отношениях. Первое, знания приобретаются

сетью из ее окружения посредством процесса обучения. Второе, силы межнейронных связей, известные как синаптические веса, используются для хранения приобретенных знаний [19].

Нейронная сеть – это композиция многих математических функций с большим количеством параметров. Она называется «нейронной сетью», потому что задумана как последовательность слоев с взаимосвязями, напоминающая нейронную сеть. Количество слоев определяет «глубину» нейронной сети [20]. Глубокая нейронная сеть (deep neural network) – это многослойная нейронная сеть, содержащая два или более скрытых слоя [21]. Типичным примером глубокой нейронной сети является нейронная сеть прямого распространения (feed-forward), в которой связи между узлами не образуют циклов. Сеть прямого распространения просто берёт набор неглубоких сетей (shallow networks) и объединяет их, подавая выход одного слоя нейронов в качестве входа в следующий слой нейронов [22].

Свёрточные нейронные сети (convolutional neural networks, CNN) – это тип нейронных сетей прямого распространения [23]. Свёрточные нейронные сети были изначально предложены [23] в статье "Gradient-Based Learning Applied to Document Recognition" 1998 года [24]. Как мощный метод представления признаков, свёрточные нейронные сети широко применяются в области компьютерного зрения. Свёрточная нейронная сеть является одной из самых успешных моделей во многих задачах компьютерного зрения [25]. Свёрточные нейронные сети – это сети, организованные по принципам биологических сетей, которые используются в компьютерном зрении для классификации изображений и обнаружения объектов [26]. Основное обоснование для свёрточной нейронной сети было получено из исследования [27] работы зрительной коры кошки, в которой определенные части поля зрения, по-видимому, возбуждают определенные нейроны. Этот более широкий принцип был использован для разработки разреженной архитектуры для свёрточных нейронных сетей. Первой базовой архитектурой, основанной на этом биологическом принципе, был неокогнитрон (neocognitron) [28], который затем был обобщен до архитектуры LeNet-5 [24]. В архитектуре свёрточной нейронной сети каждый слой сети является трёхмерным, имеет пространственную протяженность и глубину, соответствующую количеству признаков [26]. Понятие глубины одного слоя в свёрточной нейронной сети отличается от понятия глубины с точки зрения количества слоёв. Во входном слое эти признаки соответствуют цветовым каналам, таким как RGB (т. е. красный, зеленый, синий), а в скрытых слоях эти признаки представляют собой скрытые карты признаков, которые кодируют различные типы форм на изображении. Если входные данные находятся в оттенках серого (например, LeNet-5), то входной слой будет иметь глубину 1, но последующие слои будут иметь размерность 3 [26]. Архитектура свёрточной нейронной сети содержит два типа слоев, называемых слоями свёртки (convolution layers) и слоями подвыборки (пулинговые слои, слои субдискретизации, subsampling layers или pooling layers) соответственно [26]. Для свёрточных слоёв определена операция свёртки (convolution), в которой фильтр используется для отображения активаций из одного слоя в следующий (to map the activations from one layer to the next). Операция свёртки использует трёхмерный фильтр весов с той же глубиной, что и текущий слой, но с меньшей пространственной протяженностью (с меньшими значениями ширины и высоты). Скалярное произведение (dot product) между всеми весами в фильтре и любой частью пространственной области (того же размера, что и фильтр) в слое определяет значение скрытого состояния в следующем слое (после применения функции активации, такой как ReLU). Операция между фильтром и пространственными областями в слое выполняется в каждой возможной позиции для определения следующего слоя (в котором активации сохраняют свои пространственные отношения из предыдущего слоя) [26].

Рассмотрим пример свёртки [29]. Обозначим входное изображение как X . Пусть X имеет размеры $32 \times 32 \times 3$ (высота 32 пикселя, ширина 32 пикселя, глубина 3 цветовых канала). Обозначим фильтр (его ещё называют ядром свёртки, kernel) как F . Глубина F равна глубине X , то есть равна 3. Пусть высота и ширина F будут равны по 5, то есть F имеет размер $5 \times 5 \times 3$. Тогда результатом свёртки между X и F будет карта выходного отклика (output response map) S , имеющая размеры $28 \times 28 \times 1$ или $(32 - 5 + 1) \times (32 - 5 + 1) \times (3 - 3 +$

1). Каждое из $28 \times 28 \times 1 = 784$ чисел карты выходного отклика является суммой $5 \times 5 \times 3 = 75$ слагаемых, каждое из которых представляет собой произведение одного из чисел ядра (фильтра) F на соответствующее ему число входного изображения X . Запись $S = X * F$ означает: S это результат свёртки X с ядром F .

Рассмотрим пример с меньшими размерами входного изображения и ядра для возможности записать все вычисления более подробно. Пусть входное изображение X имеет размеры $H \times W \times C = 5 \times 6 \times 1$ (H – высота в пикселях, W – ширина в пикселях, C – глубина в цветовых каналах). Пусть фильтр F имеет размеры $3 \times 3 \times 1$. Пусть X и F заданы следующими матрицами (глубина как входного изображения, так и фильтра равна 1, поэтому для представления каждого из них достаточно использовать по одной матрице):

$$X = \begin{pmatrix} 3 & 8 & 1 & 0 & 2 & 4 \\ 1 & 3 & 2 & 0 & 0 & 1 \\ 6 & 3 & 9 & 5 & 7 & 1 \\ 0 & 0 & 2 & 4 & 1 & 8 \\ 5 & 9 & 3 & 7 & 2 & 0 \end{pmatrix}, F = \begin{pmatrix} 4 & 7 & 3 \\ 1 & 2 & 0 \\ 9 & 5 & 6 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Тогда размерность карты выходного отклика S будет равна $(5 - 3 + 1) \times (6 - 3 + 1) \times (1 - 1 + 1) = 3 \times 4 \times 1$. Карту S можно представить следующим образом:

$$S = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 201 & 148 & 160 & 112 \\ 55 & 81 & 71 & 111 \\ 180 & 232 & 176 & 151 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Вычисление значений карты выходного отклика S (матрица F накладывается на матрицу X так, чтобы их верхние левые элементы совпадали; затем вычисляется сумма из $3 \times 3 = 9$ произведений, в каждом из которых один множитель – это элемент матрицы F , а другой множитель – это совпадающий с ним при таком наложении элемент матрицы X , в результате получается элемент S_{11} ; затем матрица F сдвигается на один пиксель вправо по матрице X и операция повторяется, давая в результате элемент S_{12} ; после достижения конца строки матрица F возвращается в самое левое положение, сдвигается на один пиксель вниз и происходит вычисление следующей строки карты S ; при вычислении последнего элемента карты S нижние правые элементы матриц X и F совпадают):

$$S_{11} = 3 * 4 + 8 * 7 + 1 * 3 + 1 * 1 + 3 * 2 + 2 * 0 + 6 * 9 + 3 * 5 + 9 * 6 = 201 \quad (3)$$

$$S_{12} = 8 * 4 + 1 * 7 + 0 * 3 + 3 * 1 + 2 * 2 + 0 * 0 + 3 * 9 + 9 * 5 + 5 * 6 = 148 \quad (4)$$

$$S_{13} = 1 * 4 + 0 * 7 + 2 * 3 + 2 * 1 + 0 * 2 + 0 * 0 + 9 * 9 + 5 * 5 + 7 * 6 = 160 \quad (5)$$

$$S_{14} = 0 * 4 + 2 * 7 + 4 * 3 + 0 * 1 + 0 * 2 + 1 * 0 + 5 * 9 + 7 * 5 + 1 * 6 = 112 \quad (6)$$

$$S_{21} = 1 * 4 + 3 * 7 + 2 * 3 + 6 * 1 + 3 * 2 + 9 * 0 + 0 * 9 + 0 * 5 + 2 * 6 = 55 \quad (7)$$

$$S_{22} = 3 * 4 + 2 * 7 + 0 * 3 + 3 * 1 + 9 * 2 + 5 * 0 + 0 * 9 + 2 * 5 + 4 * 6 = 81 \quad (8)$$

$$S_{23} = 2 * 4 + 0 * 7 + 0 * 3 + 9 * 1 + 5 * 2 + 7 * 0 + 2 * 9 + 4 * 5 + 1 * 6 = 71 \quad (9)$$

$$S_{24} = 0 * 4 + 0 * 7 + 1 * 3 + 5 * 1 + 7 * 2 + 1 * 0 + 4 * 9 + 1 * 5 + 8 * 6 = 111 \quad (10)$$

$$S_{31} = 6 * 4 + 3 * 7 + 9 * 3 + 0 * 1 + 0 * 2 + 2 * 0 + 5 * 9 + 9 * 5 + 3 * 6 = 180 \quad (11)$$

$$S_{32} = 3 * 4 + 9 * 7 + 5 * 3 + 0 * 1 + 2 * 2 + 4 * 0 + 9 * 9 + 3 * 5 + 7 * 6 = 232 \quad (12)$$

$$S_{33} = 9 * 4 + 5 * 7 + 7 * 3 + 2 * 1 + 4 * 2 + 1 * 0 + 3 * 9 + 7 * 5 + 2 * 6 = 176 \quad (13)$$

$$S_{34} = 5 * 4 + 7 * 7 + 1 * 3 + 4 * 1 + 1 * 2 + 8 * 0 + 7 * 9 + 2 * 5 + 0 * 6 = 151 \quad (14)$$

Можно применить к изображению несколько различных фильтров для получения нескольких карт выходного отклика [29]. При получении карты выходного отклика к результату свёртки может прибавляться некоторая постоянная, которая обозначает смещение (bias), обычно обозначаемая как b [30]. При вычислении свёртки фильтр может перемещаться по входному изображению вправо (и затем вниз, после достижения конца строки) не только на 1 пиксель, но и на другое количество пикселей, которое называется *stride* (шаг) [30]. Ширина полученной карты выходного отклика равна $\frac{N-F}{stride} + 1$, где N – ширина входного изображения, F – ширина фильтра [30]. Если при делении $\frac{N-F}{stride}$ получается неократимая дробь, то такой фильтр (шириной F) с таким размером шага (*stride*) не подходит к

изображению с шириной N . Например, фильтр размером 3×3 с шагом 3 не подходит к изображению размером 7×7 , так как $\frac{7-3}{3} = \frac{4}{3} \approx 1.33$ [30].

В результате применения свёртки с фильтром F ширина и высота выходного сигнала (карты выходного отклика S) становятся меньше, чем у входного сигнала (входного изображения X). Например, если X имеет размеры 32×32 , а F имеет размеры 5×5 , то S имеет размеры $(32 - 5 + 1) \times (32 - 5 + 1) = 28 \times 28$. Если после этого (и после какой-то функции активации, например, ReLU) ещё раз применить фильтр размером 5×5 , то результат будет размером 24×24 . Таким образом, пространственный размер сигнала быстро уменьшается, нейросеть в таком случае плохо работает [30]. Для решения этой проблемы на практике иногда расширяют изображение, добавляя вокруг изображения заполнители (pad). Обычно в качестве этих заполнителей используют нули [30]. Принято использовать фильтры размером $F \times F$ с шагом $stride = 1$ и заполнением нулями на $\frac{F-1}{2}$ пикселей от границы входного изображения, это позволяет сохранять пространственный размер изображения при свёртке с фильтром [30]. Например, если размер фильтра 3×3 , то изображение дополняется вокруг рамкой (border) из нулей толщиной 1, при размере фильтра 5×5 толщина рамки равна 2 и т. д. Если несколько свёрток следуют непосредственно друг за другом (то есть к результату свёртки сигнала с одним фильтром применяется следующий фильтр), то такая последовательность свёрток эквивалентна одной свёртке. Для решения этой проблемы между свёрточными слоями добавляются функции активации [31]. Рассмотрим некоторые существующие функции активации [32]:

1) Logistic Sigmoid (логистическая сигмоида или просто сигмоида).

$$f(x) = Sigmoid(x) = \sigma(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \quad (15)$$

2) Tanh (Hyperbolic Tangent, гиперболический тангенс).

$$f(x) = Tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} = \frac{e^{2x} - 1}{e^{2x} + 1} \quad (16)$$

3) sTanh (scaled Hyperbolic Tangent, масштабированный гиперболический тангенс).

$$f(x) = sTanh(x) = a \times Tanh(bx) = a * \frac{e^{2bx} - 1}{e^{2bx} + 1} \quad (17)$$

4) PSF (Parametric Sigmoid Function, параметрическая сигмоида).

$$f(x) = PSF(x) = \frac{1}{(1+e^{-x})^m}, \quad (18)$$

где m – гиперпараметр

5) ReSech (Rectified Hyperbolic Secant, выпрямленный гиперболический секанс).

$$f(x) = ReSech(x) = x * Sech(x) = \frac{2x}{e^x + e^{-x}} \quad (19)$$

6) pTanh (Penalized Tanh, гиперболический тангенс со штрафом).

$$f(x) = pTanh(x) = \begin{cases} Tanh(x), & x \geq 0 \\ a * Tanh(x), & x < 0, a \in (0,1) \end{cases} \quad (20)$$

7) LiSHT (Linearly scaled hyperbolic tangent, линейно масштабированный гиперболический тангенс).

$$f(x) = LiSHT(x) = x * Tanh(x) = x * \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} = x * \frac{e^{2x} - 1}{e^{2x} + 1} \quad (21)$$

8) Elliott.

$$f(x) = Elliott(x) = \frac{\frac{1}{2}x}{1+|x|} + \frac{1}{2} = \frac{x}{2+2|x|} + \frac{1}{2} \quad (22)$$

9) SRS (Soft-Root-Sign).

$$f(x) = SRS(x) = \frac{x}{\frac{x}{a} + e^{-x/b}}, \quad (23)$$

где a и b – получаемые в результате обучения параметры (learnable parameters)

10) ReLU (Rectified Linear Unit, выпрямленный линейный блок).

$$f(x) = ReLU(x) = \max(0, x) = \begin{cases} x, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (24)$$

11) LReLU (Leaky Rectified Linear Unit, выпрямленный линейный блок с утечкой).

$$f(x) = LReLU(x) = \begin{cases} x, & x \geq 0 \\ 0.01 * x, & x < 0 \end{cases} \quad (25)$$

12) PReLU (Parametric Rectified Linear Unit, параметрический выпрямленный линейный блок).

$$f(x) = PReLU(x) = \begin{cases} x, & x \geq 0 \\ p * x, & x < 0 \end{cases}, \quad (26)$$

где p – получаемый в результате обучения параметр

13) PTELU (P-TELU, Parametric Tan Hyperbolic Linear Unit, параметрический гиперболический тангенциальный линейный блок).

$$f(x) = PTELU(x) = \begin{cases} x, & x \geq 0 \\ a * \operatorname{Tanh}(bx), & x < 0 \end{cases} = \begin{cases} x, & x \geq 0 \\ a * \frac{e^{2bx}-1}{e^{2b}+1}, & x < 0 \end{cases}, \quad (27)$$

где $a \geq 0$ и $b \geq 0$ – получаемые в результате обучения параметры

14) FReLU (Flexible ReLU, гибкий ReLU).

$$f(x) = FReLU(x) = \operatorname{ReLU}(x) + b = \max(0, x) + b = \begin{cases} x + b, & x \geq 0 \\ b, & x < 0 \end{cases} \quad (28)$$

15) RTReLU (Random Translation ReLU, ReLU со случайным переводом).

$$f(x) = RTReLU(x) = \begin{cases} x + a, & x + a > 0 \\ 0, & x + a \leq 0 \end{cases} = \begin{cases} x + a, & x > -a \\ 0, & x \leq -a \end{cases}, \quad (29)$$

где a – это случайное число

16) vReLU (V-shaped ReLU, ReLU в форме буквы V).

$$f(x) = vReLU(x) = \begin{cases} x, & x \geq 0 \\ -x, & x < 0 \end{cases} \quad (30)$$

функция vReLU идентична функции абсолютного значения [33]

17) DisReLU (Displaced ReLU, смещённый ReLU, DisReLU смещает точку выпрямления для учета отрицательных значений).

$$f(x) = DisReLU(x) = \begin{cases} x, & x \geq -\delta \\ -\delta, & x < -\delta \end{cases} \quad (31)$$

18) BLU (Bendable Linear Unit, гибкий линейный блок).

$$f(x) = BLU(x) = b(\sqrt{x^2 + 1} - 1) + x, \quad (32)$$

где $b \in [-1,1]$ – получаемый в результате обучения параметр, используемый для того, чтобы адаптировать форму между идентичной функцией (identity function) и функцией выпрямления (rectifier function)

19) EReLU (Elastic ReLU, эластичный ReLU).

$$f(x) = EReLU(x) = \max(R * x, 0), \quad (33)$$

где R – некоторое случайное число

20) NLReLU (Natural-Logarithm ReLU, ReLU с натуральным логарифмом).

$$f(x) = NLReLU(x) = \ln(b * \max(0, x) + 1.0), \quad (34)$$

где b – постоянная

21) PLU (Piecewise Linear Unit, кусочно-линейный блок).

$$f(x) = PLU(x) = \max(a(x + c) - c, \min(a(x - c) + c, x)), \quad (35)$$

где a и c – постоянные

22) BReLU (Bounded ReLU, ограниченный ReLU).

$$f(x) = BReLU(x) = \min(\max(0, x), A), \quad (36)$$

стабильность обучения в BReLU улучшена из-за двух выпрямлений (0 и A)

23) ELU (Exponential Linear Unit, экспоненциальный линейный блок).

$$f(x) = ELU(x) = \begin{cases} x, & x > 0 \\ a(e^x - 1), & x \leq 0 \end{cases} \quad (37)$$

где a – получаемый в результате обучения параметр

24) SELU (Scaled ELU, масштабированный экспоненциальный линейный блок).

$$f(x) = SELU(x) = \begin{cases} \lambda x, & x > 0 \\ \lambda a(e^x - 1), & x \leq 0 \end{cases} \quad (38)$$

где a – гиперпараметр [32], рекомендуемые значения: $a \approx 1.6733$, $\lambda \approx 1.05078$ [33]

25) PELU (Parametric ELU, параметрический экспоненциальный линейный блок).

$$f(x) = PELU(x) = \begin{cases} \lambda \frac{a}{b} x, & x \geq 0 \\ \lambda a(e^{x/b} - 1), & x < 0 \end{cases} \quad (39)$$

где a и b – получаемые в результате обучения параметры; PELU изменяет точку насыщения и экспоненциальный спад, а также регулирует наклон линейной функции для положительных входов для дифференцируемости [32]

26) CELU (Continuously differentiable ELU, непрерывно дифференцируемый экспоненциальный линейный блок).

$$f(x) = CELU(x) = \begin{cases} x, & x \geq 0 \\ a(e^{x/a} - 1), & x < 0 \end{cases} \quad (40)$$

где a – получаемый в результате обучения параметр

27) MPELU (Multiple PELU, множественный параметрический ELU).

$$f(x) = MPELU(x) = \begin{cases} x, & x > 0 \\ a(e^{bx} - 1), & x \leq 0 \end{cases} \quad (41)$$

где a и b – получаемые в результате обучения параметры

28) PREU (Parametric Rectified Exponential Unit, параметрический выпрямленный экспоненциальный блок).

$$f(x) = PREU(x) = \begin{cases} ax, & x > 0 \\ ax * e^{bx}, & x \leq 0 \end{cases} \quad (42)$$

где a и b – получаемые в результате обучения параметры

29) FELU (Fast ELU, быстрый ELU),

$$f(x) = FELU(x) = \begin{cases} x, & x > 0 \\ a \left(e^{\frac{x}{\ln(2)}} - 1 \right), & x \leq 0 \end{cases} \quad (43)$$

где a – получаемый в результате обучения параметр

30) EELU (Elastic ELU, эластичный ELU).

$$f(x) = EELU(x) = \begin{cases} kx, & x > 0 \\ a(e^{bx} - 1), & x \leq 0 \end{cases} \quad (44)$$

где a и b – получаемые в результате обучения параметры

31) ELiSH (Exponential Linear Sigmoid SquashHing, экспоненциальное линейное сигмоидное сжатие).

$$f(x) = ELiSH(x) = \begin{cases} \frac{x}{1+e^{-x}}, & x \geq 0 \\ \frac{e^x-1}{1+e^{-x}}, & x < 0 \end{cases} \quad (45)$$

32) Swish.

$$f(x) = Swish(x) = x * Sigmoid(bx) = \frac{x}{1+e^{-bx}}, \quad (46)$$

где b – получаемый в результате обучения параметр

33) ESwish.

$$f(x) = ESwish(x) = b * x * Sigmoid(x) = \frac{bx}{1+e^{-x}}, \quad (47)$$

где b – получаемый в результате обучения параметр

34) AAF (Adaptive AF, адаптивная функция активации).

$$f(x) = AAF(x) = \sigma(wx) * PRELU(x) + (1 - \sigma(wx)) * PELU(x) = \frac{1}{1+e^{-wx}} * \begin{cases} x, & x \geq 0 \\ p * x, & x < 0 \end{cases} + \left(1 - \frac{1}{1+e^{-wx}} \right) * \begin{cases} \lambda \frac{a}{b} x, & x \geq 0 \\ \lambda a \left(e^{\frac{x}{b}} - 1 \right), & x < 0 \end{cases} \quad (48)$$

35) BDAA (Bi-modal Derivative Adaptive Activation, Бимодальная производная адаптивная активация).

$$f(x) = BDAA(x) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{1+e^{-x}} - \frac{1}{1+e^{-x-a}} \right), \quad (49)$$

где a – получаемый в результате обучения параметр

36) TAF (Trainable Activation Function, обучаемая функция активации).

$$f(x) = TAF(x) = \sqrt{(x - a)^2 + b^2}, \quad (50)$$

где a и b – получаемые в результате обучения параметры

37) SLU (Softplus Linear Unit, линейный блок с мягким плюсом).

$$f(x) = SLU(x) = \begin{cases} ax, & x \geq 0 \\ b * \ln(e^x + 1) - c, & x < 0 \end{cases} \quad (51)$$

где a, b, c – получаемые в результате обучения параметры; a контролирует наклон в положительном направлении, b контролирует точки насыщения в отрицательном направлении, c контролирует смещение в отрицательном направлении относительно горизонтальной оси

38) RSP (Rand Softplus, функция активации со случайным мягким плюсом).

$$f(x) = RSP(x) = (1 - p) * \max(0, x) + p * \ln(1 + e^x), \quad (52)$$

где p – стохастический гиперпараметр, он улучшает способность сети противостоять шуму [32]

39) RePU (Rectified Power Unit, выпрямленный степенной блок).

$$f(x) = RePU(x) = \begin{cases} x^s, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (53)$$

где s – это гиперпараметр.

Слой подвыборки (пулинговый слой, pooling layer) уменьшает размер изображения, поскольку он объединяет соседние пиксели определенной области изображения в единое характерное (или репрезентативное, representative) значение [21]. Соседние пиксели обычно выбираются из квадратной матрицы, а количество объединяемых пикселей отличается от задачи к задаче. Репрезентативное значение обычно устанавливается как среднее (Mean pooling) или максимальное (Max pooling) значение выбранных пикселей [21]. В отличие от свёртки, пулинг применяется независимо к каждому каналу [34]. Рассмотрим пример пулинга [21]:

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 3 \\ 4 & 6 & 4 & 8 \\ 30 & 0 & 1 & 5 \\ 0 & 2 & 2 & 4 \\ 1 & 1 & 1 & 3 \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{Mean pooling}} \begin{pmatrix} 3 & 4 \\ 8 & 3 \end{pmatrix} \quad (54)$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 3 \\ 4 & 6 & 4 & 8 \\ 30 & 0 & 1 & 5 \\ 0 & 2 & 2 & 4 \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{Max pooling}} \begin{pmatrix} 6 & 8 \\ 30 & 5 \end{pmatrix} \quad (55)$$

При выполнении пулинга мы объединяем пиксели входного изображения в матрицу 2×2 без перекрытия элементов. После того, как входное изображение проходит через пулинговый слой, оно сжимается до изображения 2×2 пикселя [21]. Каждый пиксель выходного изображения соответствует матрице размером 2×2 пикселей входного изображения.

Определение категории c_i [6] в задаче детектирования объекта на изображении фактически является классификацией. По сути, распознавание изображений – это классификация. Например, распознавание того, является ли изображение на картинке кошкой или собакой, то же самое, что классификация изображения по классу кошек или собак. То же самое относится и к распознаванию букв; распознавание буквы на изображении то же самое, что и классификация изображения по одному из классов букв. Поэтому выходной слой свёрточной нейронной сети обычно использует многоклассовую классификационную нейронную сеть [21]. Полносвязные слои (fully connected layers) используются в качестве конечных слоёв в задачах классификации, где несколько (чаще всего один или два) полносвязных слоёв присоединяются поверх CNN. Для этого выход CNN выпрямляется и рассматривается как один вектор [35]. Полносвязный слой с n входными измерениями и m выходными измерениями определяется следующим образом. Выход слоя определяется следующими параметрами: матрица весов $W \in M_{m,n}(R)$ (состоящая из m строк и n столбцов) и вектор смещения (bias vector) $b \in R^m$. Выход полносвязного слоя FC с функцией активации f и заданным входным вектором $x \in R^n$ определяется как $FC(x) = f(Wx + b)$, $FC(x) \in R^m$,

где Wx – произведение матриц, функция f применяется покомпонентно (is applied componentwise, то есть к каждому из компонентов вектора $(Wx + b)$ по отдельности) [35].

Рассмотрим архитектуру свёрточной нейронной сети на примере сети LeNet-5 [31]. Входной слой (input layer) имеет размер сигнала на выходе $Depth \times Height \times Width = 1 \times 28 \times 28$. Далее идёт свёрточный слой из 20 фильтров, каждый фильтр имеет размер $1 \times 5 \times 5$ ($Stride = 1$, $Pad = 2$), на выходе размер $20 \times 28 \times 28$, добавляемые веса: $20 \times 1 \times 5 \times 5 = 500$. За этим слоем следует функция активации ReLU (размер на её выходе $20 \times 28 \times 28$). Далее пулинговый слой (Max pooling, матрицы 2×2), размер сигнала на выходе равен $20 \times 14 \times 14$. Далее идёт свёрточный слой из 50 фильтров, каждый фильтр имеет размер $20 \times 5 \times 5$ ($Stride = 1$, $Pad = 2$), на выходе размер $50 \times 14 \times 14$, добавляемые веса: $50 \times 20 \times 5 \times 5 = 25000$. Далее снова функция активации ReLU (размер на выходе $50 \times 14 \times 14$). Далее пулинговый слой (Max pooling, матрицы 2×2), размер сигнала на выходе равен $50 \times 7 \times 7$. Затем слой выпрямления (Flatten), который преобразует трёхмерный сигнал размером $50 \times 7 \times 7$ в одномерный вектор размером $50 \times 7 \times 7 = 2450$. Далее следует полно связанный слой (который иногда вместо “fully connected layer” называют линейным, “linear”). Этот слой на вход принимает вектор из 2450 чисел, на выход отправляет 500 чисел. Соответственно, добавляется $2450 \times 500 = 1225000$ весов (весовых коэффициентов). За этим слоем следует функция активации ReLU, после неё следующий полно связанный слой с 500 входами и 10 выходами (соответственно, этот слой добавляет $500 \times 10 = 5000$ весовых коэффициентов). Хотя описание архитектуры свёрточной нейронной сети LeNet-5 в статье [24] отличается от этого (представленного в [31]), это описание остаётся практическим примером архитектуры CNN.

Теперь (после введения и пояснения некоторых необходимых понятий) рассмотрим классификацию методов детектирования объекта, основанных на глубоком обучении (Deep Learning based Detection Methods) [10].

Основанные на глубоком обучении методы детектирования объектов делятся на две группы: одноступенчатые (одноэтапные, одностадийные) детекторы (One-stage detector) и двухступенчатые (двухэтапные, двухстадийные) детекторы (Two-stage detector) [10]. Задача обнаружения объектов – это двойная задача, которая состоит из распознавания и локализации объектов. Для этой задачи современные модели можно разделить на две категории: двухступенчатые и одноступенчатые детекторы. В общем случае двухступенчатые детекторы, как правило, обеспечивают более высокую точность, но с более высокими вычислительными затратами, чем одноступенчатые детекторы [36]. Двухступенчатые детекторы делят процесс обнаружения на предложение региона (region proposal) и этап классификации (classification stage). Эти модели сначала предлагают несколько кандидатов на объекты (object candidates), известных как области интереса (Regions of Interest, RoI), используя опорные блоки (якоря, anchors). На втором этапе предложения классифицируются, и их локализация уточняется. С другой стороны, одноступенчатые детекторы содержат одну полностью свёрточную сеть прямого распространения (feed-forward fully convolutional network), которая напрямую предоставляет ограничивающие коробки (bounding boxes) и классификацию объектов [36].

К двухступенчатым методам детектирования объекта относятся: R-CNN (Regions with CNN features, регионы с признаками свёрточной нейросети), SPPNet (Spatial Pyramid Pooling Networks, пространственные пирамидальные сети объединения или пространственные пирамидальные пулинговые сети), Fast R-CNN (быстрый R-CNN, улучшение R-CNN и SPPNet), Faster R-CNN (более быстрый R-CNN), FPN (Feature Pyramid Networks, сети пирамиды признаков). К одноступенчатым методам детектирования объектов относятся: YOLO (You Only Look Once, буквальный перевод: “ты только смотришь один раз”, другой вариант перевода: “стоит только раз взглянуть”), SSD (Single Shot MultiBox Detector, приблизительно можно перевести как “детектор одного снимка с множеством рамок”), RetinaNet, CornerNet, CenterNet, DETR (DEtection TRansformer) [10]. Теперь рассмотрим некоторые методы детектирования объектов подробнее.

Корреляционный анализ

Задача детектирования объектов на изображении состоит в установлении наличия на изображении объектов (то есть яркостных областей с определёнными свойствами) и в определении их координат на плоскости изображения (если объекты обнаружены). Основной принцип детектирования объектов на изображении состоит в сопоставлении функции яркости изображения с некоторым эталоном (фрагментом поля яркости, который содержит детектируемый объект). При выполнении детектирования эталон последовательно перемещается по полю изображения, и в каждом положении исследуется сходство между эталоном и областью изображения, в которой в данный момент находится эталон. Присутствующие на изображении искажения и шумы чаще всего делают полное совпадение эталона с областью изображения невозможным ни в каком из положений эталона [37]. Для поиска шаблона (эталона) в изображении можно использовать корреляционный анализ [38]. В некоторых источниках такой способ называется “корреляционное сопоставление с эталоном” [39]. Более математически точно корреляционный анализ описывается следующим образом. Есть изображение $f(x, y)$ размерами $M \times N$ (M – высота, N – ширина) и маска (ещё называемая эталоном) $w(x, y)$ размерами $m \times n$ (m – высота, n – ширина). $f(x, y)$ и $w(x, y)$ – это функции двух дискретных переменных, определяющие яркость пикселей изображения и эталона соответственно, принимающие значения из некоторого диапазона (обычно $[0, 1]$ или $[0, 255]$). Величина $\gamma(x, y)$ – это коэффициент корреляции между фрагментом изображения f и эталоном w при расположении центра эталона w в точке изображения f с координатами (x, y) . Значение $\gamma(x, y)$ вычисляется [39] по следующей формуле.

$$\gamma(x, y) = \frac{\sum_s \sum_t [w(s, t) - \bar{w}] [f(x+s, y+t) - \bar{f}_{xy}]}{\sqrt{(\sum_s \sum_t [w(s, t) - \bar{w}]^2) * (\sum_s \sum_t [f(x+s, y+t) - \bar{f}_{xy}]^2)}}, \quad (56)$$

где \bar{w} – среднее значение элементов эталона w (вычисляемое только один раз), \bar{f}_{xy} – среднее значение элементов изображения f в той области, которая совпадает с текущим положением эталона w (предполагается, что f и w в области пересечения не являются константами [39]). Коэффициент корреляции $\gamma(x, y)$ принимает значения в диапазоне $[-1, 1]$. После вычисления значения $\gamma(x, y)$ (то есть коэффициента корреляции для одного пикселя изображения f , а именно для случая расположения центра эталона w над пикселям изображения f с координатами (x, y)) эталон w перемещается на 1 пиксель вправо по изображению f и вычисление коэффициента корреляции выполняется снова. Перемещение центра эталона w так, чтобы он проходил по всем пикселям f (и вычисление коэффициента корреляции для каждого положения центра w), даёт полное множество коэффициентов корреляции $\gamma(x, y)$. После этого выполняется поиск такой точки (x, y) на изображении, для которой коэффициент корреляции принимает наибольшее значение [39]. Эта точка является той точкой, при расположении в которой центра эталона w этот эталон будет в наибольшей степени совпадать с перекрывающим им фрагментом изображения. Таких точек (с максимальным значением коэффициента корреляции) может быть несколько (это значит, что при расположении центра эталона в каждой из этих точек эталон будет сильнее всего совпадать с перекрывающим фрагментом изображения). Для случая, когда центр эталона w располагается вблизи границы изображения f (который возникает, так как центр эталона w проходит по всем пикселям изображения f , включая находящиеся вблизи границы), изображение f по краям дополняется на $\frac{m-1}{2}$ пикселей вверх и вниз и на $\frac{n-1}{2}$ пикселей влево и вправо (где m и n – это высота и ширина эталона w соответственно, которые обычно выбираются нечётными числами) [39].

Выделение ключевых точек

Ключевые точки – это точки на изображении, которые характеризуют их локальные особенности и выделяются для последующего сопоставления. Дескрипторы – это признаковые описания, которые выделяются из участков изображения, соответствующих ключевым точкам. Дескрипторы используются для сопоставления изображений, классификации и других задач [40]. Обнаружение ключевых точек (называемых ещё характерными точками, feature points, FP) или ориентиров (landmarks) является важным шагом в обработке изображений и

компьютерном зрении. Оно предоставляет входную информацию для дальнейших операций, таких как регистрация изображений, слияние изображений, анализ временной последовательности и распознавание объектов. Под характерными точками мы понимаем точки, которые легко идентифицировать на изображении, такие как углы, пересечения линий, перекрёстки в форме буквы Т и другие [41]. Дескриптор используется для описания области (region) вокруг ключевых точек. Дескриптор обычно представляет собой вектор действительных (real) чисел, имеющий фиксированную размерность, который представляет окрестность вокруг ключевой точки. Каждый дескриптор связан с ключевой точкой [42]. Одним из важных свойств детектора ключевых точек является то, что одна и та же точка сцены может быть обнаружена повторно с разных точек наблюдения [43]. Наиболее ценным свойством детектора ключевых (характеристических) точек является его повторяемость, которая выражает надежность детектора для нахождения тех же самых физических точек при разных условиях просмотра [44]. Рассмотрим некоторые детекторы ключевых точек, в основном детекторы углов.

Детектор Моравеца – самый простой из существующих детекторов ключевых точек [45]. Детектор Моравеца был предложен в статье "Rover Visual Obstacle Avoidance" [46] в 1981 году. Направленное отклонение (дисперсия, variance) измеряется по небольшим квадратным окнам. Вычисляются суммы квадратов разностей пикселей, смежных в каждом из четырёх направлений (горизонтальном, вертикальном и двух диагональных) по каждому окну, мера интереса (interest measure) окна является минимумом этих четырёх сумм. Выбираются признаки (features), где мера интереса имеет локальные максимумы. Выбранные признаки сохраняются в массиве, отсортированном в порядке убывания меры интереса [46]. Пусть $f(x, y)$ – исходное изображение размером $M \times N$ (M – высота, N – ширина). Пусть в качестве размера окна w выбрано число k , то есть окно w – это квадрат $k \times k$ пикселей. Для каждого пикселя $f(x, y)$ изображения f выполняется следующее. Окно w своим центральным пикселием накладывается на пиксель $f(x, y)$. Затем вычисляется по отдельности 4 суммы. При вычислении каждой из сумм окно w смещается на 1 пиксель в одну из четырёх разных сторон (вверх, вверх вправо, вправо, вниз вправо). После смещения окна w вычисляется сумма из k^2 квадратов разностей между пикселями, попавшими в окно w до его смещения, и соответствующими им пикселями, попавшими в окно w после его смещения. Затем выбирается минимальная из этих 4 сумм, она называется мерой интереса для пикселя с координатами (x, y) . Если значение меры интереса для пикселя $f(x, y)$ больше некоторого порога (изначально установленного, threshold), значит в точке с координатами (x, y) на изображении f есть угол. В некоторых источниках [47][48] суммы квадратов разностей между пикселями (попавшими в окно w до его смещения на 1 пиксель и после этого) вычисляются не для 4 направлений, а для всех 8 направлений (по два направления вертикальных и горизонтальных и четыре диагональных). В таком случае минимальное значение (обозначаемое мерой интереса для данного пикселя) выбирается из восьми сумм вместо четырёх, в остальном алгоритм работы детектора Моравеца не меняется. Размер k окна w обычно принимается равным 3, 5 или 7 [47]. Рассмотрим пример работы детектора Моравеца. Пусть есть следующее изображение f и окно w размером $k \times k = 3 \times 3$:

$$f = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 5 & 6 & 7 & 8 \\ 9 & 10 & 11 & 12 \\ 13 & 14 & 15 & 16 \\ 17 & 18 & 19 & 20 \end{pmatrix} \quad (57)$$

Вычислим меру интереса (то есть минимум из 4 сумм, по $3 \times 3 = 9$ слагаемых в каждой) для пикселя 10 (в примере все пиксели имеют разные числовые значения для того, чтобы по числу в формуле можно было однозначно понять, какой именно пиксель имеется в

виду). При наложении окна центром на пиксель 10 в окно попадают пиксели $\begin{pmatrix} 5 & 6 & 7 \\ 9 & 10 & 11 \\ 13 & 14 & 15 \end{pmatrix}$.

При смещении окна на 1 пиксель вверх (\uparrow) в него попадают пиксели $\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 5 & 6 & 7 \\ 9 & 10 & 11 \end{pmatrix}$. Сумма квадратов разностей соответствующих пикселей равна $(5 - 1)^2 + (6 - 2)^2 + (7 - 3)^2 + (9 - 5)^2 + (10 - 6)^2 + (11 - 7)^2 + (13 - 9)^2 + (14 - 10)^2 + (15 - 11)^2 = 144 = S_{\uparrow}$. При смещении окна на 1 пиксель вправо (\nearrow) в него попадают пиксели $\begin{pmatrix} 2 & 3 & 4 \\ 6 & 7 & 8 \\ 10 & 11 & 12 \end{pmatrix}$. Сумма квадратов разностей соответствующих пикселей равна $(5 - 2)^2 + (6 - 3)^2 + (7 - 4)^2 + (9 - 6)^2 + (10 - 7)^2 + (11 - 8)^2 + (13 - 10)^2 + (14 - 11)^2 + (15 - 12)^2 = 81 = S_{\nearrow}$. Аналогично, при смещении окна на 1 пиксель вправо (\rightarrow) и вниз вправо (\searrow) в него попадают пиксели $\begin{pmatrix} 6 & 7 & 8 \\ 10 & 11 & 12 \\ 14 & 15 & 16 \end{pmatrix}$ и $\begin{pmatrix} 10 & 11 & 12 \\ 14 & 15 & 16 \\ 18 & 19 & 20 \end{pmatrix}$ соответственно. Суммы квадратов разностей в этих случаях равны $S_{\rightarrow} = 9$ и $S_{\searrow} = 225$. Минимальная из 4 сумм равна $\min(S_{\uparrow}, S_{\nearrow}, S_{\rightarrow}, S_{\searrow}) = \min(144, 81, 9, 225) = 9$. Следовательно, для пикселя 10 мера интереса равна 9. Если порог (установленный заранее) меньше чем 9, то пиксель 10 отмечается как угол. Программные реализации детектора Моравеца на языке Python приведены в [49][50]. Детектор углов Моравеца работает, рассматривая локальное окно в изображении и определяя средние изменения интенсивности изображения, которые возникают в результате смещения окна на небольшую величину в различных направлениях. Необходимо рассмотреть три случая [51]:

- 1) Если оконный фрагмент изображения плоский (т. е. приблизительно постоянен по интенсивности), то все сдвиги приведут только к небольшому изменению;
- 2) Если окно охватывает край, то сдвиг вдоль края приведет к небольшому изменению, но сдвиг перпендикулярно краю приведет к большому изменению;
- 3) Если оконный фрагмент является углом или изолированной точкой, то все сдвиги приведут к большому изменению. Таким образом, угол можно обнаружить, определив, когда минимальное изменение, произведенное любым из сдвигов, велико.

Более математически строго детектор Моравеца записывается так [51]. Обозначим интенсивность изображения через I , тогда изменение E , вызванное сдвигом (x, y) , будет определяться выражением:

$$E_{x,y} = \sum_{u,v} w_{u,v} [I_{x+u,y+v} - I_{u,v}]^2, \quad (58)$$

где w определяет окно изображения: оно является единицей в определённом прямоугольном регионе и нулём вне его. Сдвиги (x, y) принимают пары значений $\{(1,0), (1,1), (0,1), (-1,1)\}$. Следовательно, детектор Моравеца – это поиск локального максимума среди $\min\{E\}$, который больше некоторого порога [51]. К недостаткам детектора Моравеца относятся [52]: чувствительность к шуму, отсутствие полной инвариантности к преобразованию поворота (так как детектор Моравеца рассматривает сдвиги с шагом 45°), возникновение ошибок детектирования при наличии большого количества диагональных рёбер.

Детектор Харриса был предложен [51] в статье “A Combined Corner and Edge Detector” 1988 года как улучшенная версия детектора Моравеца. В этой статье указаны три недостатка детектора Моравеца и предложены способы их решения:

1) Недостаток: ответ (response) анизотропен, поскольку рассматривается только дискретный набор сдвигов через каждые 45 градусов. Решение: все возможные маленькие сдвиги можно покрыть, выполняя аналитическое расширение относительно начала сдвига:

$$E_{x,y} = \sum_{u,v} w_{u,v} [I_{x+u,y+v} - I_{u,v}]^2 = \sum_{u,v} w_{u,v} [xX + yY + O(x^2, y^2)]^2, \quad (59)$$

где первые градиенты аппроксимируются таким образом: $X = I \otimes (-1, 0, 1) \approx \frac{\partial I}{\partial x}$, $Y = I \otimes (-1, 0, 1)^T \approx \frac{\partial I}{\partial y}$. Следовательно, для малых сдвигов E может быть записано как

$$E(x, y) = Ax^2 + 2Cx + By^2, \quad (60)$$

где $A = X^2 \otimes w$, $B = Y^2 \otimes w$, $C = (XY) \otimes w$.

2) Недостаток: ответ шумный, так как окно является бинарным и прямоугольным.

Решение: использовать гладкое круглое окно, например, гауссово: $w_{u,v} = e^{-\frac{u^2+v^2}{2\sigma^2}}$.

3) Недостаток: оператор слишком легко (быстро, охотно, readily) реагирует на края, поскольку учитывается только минимум E . Решение: переформулировать угловую меру, чтобы использовать изменение E в зависимости от направления сдвига. Изменение E для малого сдвига (x, y) может быть кратко записано как

$$E(x, y) = (x, y)M(x, y)^T, \quad (61)$$

где M – это симметричная матрица 2×2 : $M = \begin{bmatrix} A & C \\ C & B \end{bmatrix}$.

Изменение E тесно связано с локальной автокорреляционной функцией, а матрица M описывает его форму в начале координат (в частности, квадратичные члены в разложении Тейлора). Пусть α, β – собственные значения матрицы M . α и β будут пропорциональны главным кривизнам (principal curvatures) локальной автокорреляционной функции и образуют вращательно-инвариантное (rotationally invariant) описание матрицы M . Как и прежде (то есть для детектора Моравеца), следует рассмотреть три случая:

1) Если обе кривизны малы, так что локальная автокорреляционная функция плоская, то область оконного изображения имеет приблизительно постоянную интенсивность (т. е. произвольные сдвиги фрагмента изображения вызывают небольшое изменение E);

2) Если одна кривизна высокая, а другая низкая, так что локальная автокорреляционная функция имеет форму гребня, то только сдвиги вдоль гребня (т. е. вдоль края) вызывают небольшое изменение E : это указывает на край;

3) Если обе кривизны высокие, так что локальная автокорреляционная функция имеет острый пик, то сдвиги в любом направлении увеличивают E : это указывает на угол.

Для количественной оценки угла детектор Харриса использует величину R , определяемую как “ответ угла” (corner response) или “мера качества углов и краёв” (a measure of corner and edge quality). Значение R вычисляется следующим образом [51].

$$R = AB - C^2 - k(A + B)^2 = \alpha\beta - k(\alpha + \beta)^2, \quad (62)$$

где k – это эмпирическая константа, $k \in [0.04; 0.06]$ [52]. Программные реализации детектора Харриса на языке Python приведены в [53] (встроенной функцией cornerHarris библиотеки OpenCV) и [54] (встроенной функцией и вручную). Реализация детектора Харриса с помощью встроенной функции работает быстрее написанной вручную в несколько раз.

Детектор углов Shi-Tomasi является модификацией детектора Харриса [55][56]. В детекторе Харриса функция отклика (scoring function, она же corner response) вычисляется как $R = \alpha\beta - k(\alpha + \beta)^2$ (где α, β – собственные числа матрицы M), вместо этого в детекторе Shi-Tomasi функция отклика вычисляется как $R = \min(\alpha, \beta)$. Детектор Shi-Tomasi был предложен в [57]. Пиксель определяется как угол, если значение R больше некоторого порога λ . Выбор минимума из двух собственных значений матрицы M в качестве функции отклика объясняется следующим образом. На практике, когда меньшее собственное значение достаточно велико, чтобы соответствовать критерию шума, матрица M обычно также хорошо обусловлена. Фактически, изменения интенсивности в окне ограничены максимально допустимым значением пикселя, так что большее собственное значение не может быть произвольно большим. В заключение, если два собственных значения матрицы M равны α и β , мы принимаем окно, если $\min(\alpha, \beta) > \lambda$, где λ – заранее установленное пороговое значение. В [56] приведена реализация детектора углов Shi-Tomasi с использованием библиотеки OpenCV языка Python. Иногда детектор Shi-Tomasi называют детектором Kanade-Tomasi [58].

Ещё одним детектором углов является детектор Förstner. Этот алгоритм в качестве меры отклика использует ту же самую величину, что и детектор Харриса (то есть $R = \alpha\beta - k(\alpha + \beta)^2$) [55][59]. Детектор Förstner был предложен в [60]. Детектор Förstner использует более сложную (по сравнению с детектором Харриса) многомасштабную (multiscale) реализацию и получает лучшие результаты, но за счёт более высокой вычислительной сложности.

Детектор углов SUSAN был предложен в [61]. Название этого алгоритма является сокращением от “Smallest Univalue Segment Assimilating Nucleus” (что переводится как “Наименьший однозначный сегмент ассилирующего ядра”). Детектор SUSAN позволяет определять не только углы (corner), но и границы (edge). В начале работы алгоритма SUSAN задаются параметры: R_1 – радиус маски (маска W имеет форму круга, центр которого каждый раз располагается в том пикселе, для которого в данный момент определяется, принадлежит ли он углу или границе) и t – пороговое значение (порог разности яркости, brightness difference threshold). Алгоритм SUSAN последовательно проходит по каждому пикселью \vec{r}_0 (координаты пикселя задаются координатами радиус-вектора этого пикселя) изображения и для каждого пикселя выполняет следующие действия. На пиксель \vec{r}_0 (называемый ядром) своим центром накладывается маска W . Для каждого пикселя \vec{r} , который попадает внутрь маски W ($\vec{r} \neq \vec{r}_0$), вычисляется значение функции сходства $c(\vec{r}, \vec{r}_0)$, которая определяет, насколько пиксель \vec{r} отличается от пикселя \vec{r}_0 (то есть ядра). При вычислении функции сходства c используется установленное заранее пороговое значение t . Значение функции сходства c вычисляется как

$$c(\vec{r}, \vec{r}_0) = \begin{cases} 1, & |I(\vec{r}) - I(\vec{r}_0)| \leq t \\ 0, & |I(\vec{r}) - I(\vec{r}_0)| > t \end{cases} \quad (63)$$

или

$$c(\vec{r}, \vec{r}_0) = \exp\left(-\left(\frac{|I(\vec{r}) - I(\vec{r}_0)|}{t}\right)^6\right), \quad (64)$$

где $I(\vec{r})$ – яркость пикселя \vec{r} . В [61] авторы алгоритма SUSAN указали, что значительно более стабильный результат обеспечивает использование второй формулы (которая использует экспоненту) для вычисления значений функции сходства. Затем для пикселя \vec{r}_0 вычисляется “бегущая сумма” (running total) $n(\vec{r}_0)$, равная сумме значений функции сходства для всех пикселей \vec{r} , попавших внутрь маски W при её наложении центром на ядро \vec{r}_0 . То есть $n(\vec{r}_0) = \sum_W c(\vec{r}, \vec{r}_0)$. Соответственно, при вычислении $c(\vec{r}, \vec{r}_0)$ по первой формуле (без экспоненты) бегущая сумма равна количеству таких пикселей изображения (попавших внутрь W), интенсивности которых отличаются от интенсивности ядра не более чем на t . Параметр t в данном случае определяет минимальный контраст признака, который будет обнаружен, а также максимальное количество шума, которое будет проигнорировано. В [61] авторами показано, что производительность алгоритма SUSAN не зависит от подбора (fine-tuning) значения t . Затем бегущая сумма $n(\vec{r}_0)$ сравнивается с фиксированным пороговым значением g (называемым ещё “геометрический порог”, geometric threshold), которое определяется как

$$g = \frac{3}{4} n_{max}, \quad (65)$$

где n_{max} – это максимальное значение, которого может достигнуть бегущая сумма $n(\vec{r}_0)$. Следовательно, если функция сходства $c(\vec{r}, \vec{r}_0)$ вычисляется по первой формуле, то значение n_{max} на 1 меньше количества пикселей, попавших под маску W (то есть когда яркости всех попавших под маску W пикселей \vec{r} близки к яркости пикселя \vec{r}_0 , каждый из этих пикселей, за исключением самого пикселя \vec{r}_0 , добавляет 1 в бегущую сумму). Результатом сравнения бегущей суммы $n(\vec{r}_0)$ с геометрическим порогом g является значение

$$R(\vec{r}_0) = \begin{cases} g - n(\vec{r}_0), & n(\vec{r}_0) < g \\ 0, & n(\vec{r}_0) \geq g \end{cases}, \quad (66)$$

называемое начальным ответом края (initial edge response). Пиксель \vec{r}_0 определяется как угол тогда, когда $n(\vec{r}_0) < \frac{1}{2} n_{max}$ [61].

Детектор углов Trajkovic (часто называемый “Trajkovic and Hedley corner detector”) был предложен в [59]. Алгоритм основан на изменении интенсивности изображения вдоль произвольных линий, проходящих через исследуемую точку в окрестности этой точки. Угол обнаруживается, если изменение интенсивности изображения вдоль таких линий велико для всех ориентаций линий. Изменение находится с использованием только первых производных, и поэтому детектор углов менее чувствителен к шуму, чем методы на основе кривизны, которые используют производные второго порядка [59]. Алгоритм Trajkovic использует линейную интерполяцию для вычисления производных первого порядка по направлению [произвольных линий, проходящих через исследуемую точку]. Этот алгоритм не делает

никаких предположений о структуре изображения вблизи углов и может обнаружить любой тип пересечения. Алгоритм очень быстрый, поскольку он эффективно отбрасывает точки с небольшими изменениями интенсивности. Дальнейшее увеличение скорости достигается за счет использования многосеточного (multigrid) подхода, который также в значительной степени исключает обнаружение ложных углов в текстурированных областях изображения (то есть тех областях изображения, в которых интенсивности многих соседних пикселей значительно отличаются, но это не означает наличие угла, например, если на фотографию попадает экран телевизора, показывающего в этот момент белый шум). Авторы в [59] называют этот алгоритм MIC (minimum intensity change, минимальное изменение интенсивности), поскольку точки, минимальное изменение интенсивности которых по всем направлениям велико, объявляются углами.

В начале работы алгоритма вокруг исследуемого пикселя N рисуется воображаемая дискретизированная окружность S_n нечётного диаметра n , состоящая из чётного количества приблизительно равноудалённых от центрального пикселя N пикселей P_i и P'_i . Обычно диаметр выбирается равным $n = 3$, $n = 5$ или $n = 7$. Для этих значений n дискретизированные окружности S_n выглядят следующим образом:

$$S_3 = \begin{pmatrix} P_1 & P_2 & P_3 \\ P'_4 & N & P_4 \\ P'_3 & P'_2 & P'_1 \end{pmatrix}, \quad (67)$$

$$S_5 = \begin{pmatrix} o & P_1 & P_2 & P_3 & o \\ P'_6 & o & o & o & P_4 \\ P'_5 & o & N & o & P_5 \\ P'_4 & o & o & o & P_6 \\ o & P'_3 & P'_2 & P'_1 & o \end{pmatrix}, \quad (68)$$

$$S_7 = \begin{pmatrix} o & o & P_1 & P_2 & P_3 & o & o \\ o & P'_8 & o & o & o & P_4 & o \\ P'_7 & o & o & o & o & o & P_5 \\ P'_6 & o & o & N & o & o & P_6 \\ P'_5 & o & o & o & o & o & P_7 \\ o & P'_4 & o & o & o & P_8 & o \\ o & o & P'_3 & P'_2 & P'_1 & o & o \end{pmatrix}, \quad (69)$$

где символом o обозначены те пиксели, которые не используются при построении дискретизированной окружности S_n . После этого для пикселя N вычисляется значение R_N , называемое функцией ответа угла (corner response function, CRF).

$$R_N = \min_{P, P' \in S_n} \left((I(P) - I(N))^2 + (I(P') - I(N))^2 \right), \quad (70)$$

где $I(x)$ – это интенсивность пикселя x . Минимум находится по всем наборам (парам) противоположных относительно центрального пикселя N точек P_i и P'_i , где $i \in [1; 4]$ для S_3 , $i \in [1; 6]$ для S_5 , $i \in [1; 8]$ для S_7 . Угловыми объявляются те пиксели, значение CRF для которых больше некоторого порога.

Заключение

В этой статье рассмотрены задачи автоматического определения объекта (детектирования) и удержания объекта в фокусе (трекинга). Приведены некоторые практические задачи, в которых детектирование или трекинг объектов может применяться, что обосновывает актуальность этой темы. Рассмотрены различные варианты постановки задачи детектирования (определение наличия объекта без важности его местоположения, определение местоположения в виде ограничивающей коробки, определение местоположения и класса). Затем в статье обзорно рассмотрены классификация методов детектирования объектов и история их развития. Так как из всех существующих методов детектирования объектов лучшие результаты показывают методы, использующие свёрточные нейронные сети, в статье приводится общее описание работы сначала нейронных сетей в целом, затем свёрточных нейронных сетей в частности.

После этого приводится более подробное описание таких методов детектирования, как корреляционный анализ (частный случай сопоставления изображения с эталоном) и выделение особых точек (рассмотрены детекторы углов Моравеца, Харриса, Shi-Tomasi, Förstner, SUSAN, Trajkovic).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Verschae R and Ruiz-del-Solar J (2015) Object Detection: Current and Future Directions. *Front. Robot. AI* 2:29. doi: 10.3389/frobt.2015.00029
2. Lin T. Fast and Accurate Object Detection on Asymmetrical Receptive Field //arXiv preprint arXiv:2303.08995. – 2023.
3. M. Chinnarao, R. Goutham Sai Kalyan, T. Naga Pravallika, B. Srinivas, Object Detection Using Yolo And Tensor Flow, *Int. J. in Engi. Sci.*, 2024, Vol 1, Issue 1, 13-23. <https://doi.org/10.5281/zenodo.11825059>
4. Yilmaz, A., Javed, O., and Shah, M. 2006. Object tracking: A survey. *ACM Comput. Surv.* 38, 4, Article 13 (Dec. 2006), 45 pages. DOI = 10.1145/1177352.1177355 <http://doi.acm.org/10.1145/1177352.1177355>
5. Z. -Q. Zhao, P. Zheng, S. -T. Xu and X. Wu. Object Detection With Deep Learning: A Review. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, vol. 30, no. 11, pp. 3212-3232, Nov. 2019, doi: 10.1109/TNNLS.2018.2876865.
6. Casado-García, Á., & Heras, J. (2020). Ensemble Methods for Object Detection. European Conference on Artificial Intelligence, 2688–2695. <https://doi.org/10.3233/FAIA200407>
7. R Mohan, Midhula Vijayan, Athira Ap, 2016, Object Detection and Tracking Techniques: A Survey, *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH & TECHNOLOGY (IJERT) ICACC – 2016 (Volume 4 – Issue 34)*, DOI: 10.1757/IJERTCONV4IS34001
8. Y. Wu, J. Lim and M. -H. Yang. Online Object Tracking: A Benchmark. 2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Portland, OR, USA, 2013, pp. 2411-2418, doi: 10.1109/CVPR.2013.312.
9. Rupesh Kumar Rout. A Survey on Object Detection and Tracking Algorithms. Thesis for the degree of Master Of Technology, National Institute of Technology Rourkela, 2013.
10. Z. Zou, K. Chen, Z. Shi, Y. Guo and J. Ye. Object Detection in 20 Years: A Survey. *Proceedings of the IEEE*, vol. 111, no. 3, pp. 257-276, March 2023, doi: 10.1109/JPROC.2023.3238524.
11. A. Krizhevsky, I. Sutskever, and G. E. Hinton. Imagenet classification with deep convolutional neural networks. *Advances in neural information processing systems*, 2012, pp. 1097–1105.
12. Nicholson, Lachlan, Michael Milford, and Niko Sünderhauf. Quadricslam: Dual quadrics from object detections as landmarks in object-oriented slam. *IEEE Robotics and Automation Letters* 4.1 (2018): 1-8.
13. Sal, Ferhat. A Survey on Object Detection Technologies And Convolutional Neural Networks For Robotics. Bogazici University, 2020.
14. Park, J.; Aryal, P.; Mandumula, S.R.; Asolkar, R.P. An Optimized DNN Model for Real-Time Inferencing on an Embedded Device. *Sensors* 2023, 23, 3992. <https://doi.org/10.3390/s23083992>
15. Skansi, Sandro. *Introduction to Deep Learning: From Logical Calculus to Artificial Intelligence*. Springer International Publishing AG, 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-73004-2. 196 p.
16. Fleuret, Francois. *The Little Book of Deep Learning*. Université de Genève, 2024, fleuret.org/public/lbdl.pdf.
17. Kamble, Sameer Baban, et al. Deep Learning: Semester IV (Subject Code: PSIT403a). Institute of Distance and Open Learning, University of Mumbai, 2022.
18. M. Anthony and P. L. Bartlett, *Neural Network Learning: Theoretical Foundations*, Cambridge: Cambridge University Press, 1999, 389 p. ISBN 978-0-521-57353-5, 978-0-521-11862-0.
19. Haykin, S. (2009). *Neural networks and learning machines* (3rd ed.). Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall. ISBN-13:978-0-13-147139-9.
20. Chan, Helsa. Numerical Study of a Partial Differential Equation Approach to Deep Neural Networks. Masters thesis, University of Waterloo, 2017.
21. Kim, Phil. *MATLAB Deep Learning With Machine Learning, Neural Networks and Artificial Intelligence*. Apress, 2017. ISBN-13 (electronic): 978-1-4842-2845-6. DOI: 10.1007/978-1-4842-2845-6.
22. Smets, Bart M. N. *Mathematics of Neural Networks*. Lecture notes, 12 Nov. 2022. arXiv:2403.04807v1.
23. Walker, Ian. Deep Convolutional Neural Networks for Brain Computer Interface using Motor Imagery. Masters thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London, 4 Sept. 2015.
24. LeCun, Y., Bottou, L., Bengio, Y., & Haffner, P. (1998). Gradient-based learning applied to document recognition. *Proceedings of the IEEE*, 86(11), pp. 2278–2324. doi:10.1109/5.726791.
25. Zhu, X., Xu, Y., Xu, H., & Chen, C. (2018). Quaternion convolutional neural networks. In *Proceedings of the European conference on computer vision (ECCV)* (pp. 631-647).
26. Aggarwal, C. C. (2018). *Neural networks and deep learning: A textbook*. Springer Nature Switzerland AG. 497 p. ISBN 978-3-319-94463-0 (eBook). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-94463-0>.
27. David H. Hubel and Torsten N. Wiesel. Receptive fields of single neurones in the cats striate cortex. *The Journal of Physiology* 148 (1959), pp. 574-591. DOI: 10.1113/jphysiol.1959.sp006308.
28. Fukushima, K. and Miyake, S. (1982). Neocognitron: A new algorithm for pattern recognition tolerant of deformations and shifts in position. *Pattern Recognition*, 15(6), 455–469. DOI: 10.1016/0031-3203(82)90024-3.

29. Lecture 6: The Convolutional Layer in Convolutional Networks. Lecture slides, KTH Royal Institute of Technology, 29 May 2017, www.kth.se/social/files/592c00bff2765477d817718f/Lecture6.pdf.
30. Li, F.-F., Karpathy, A., & Johnson, J. (2016). Convolutional Neural Networks [Lecture slides]. Stanford Vision and Learning Lab (SVL), Stanford University. https://cs231n.stanford.edu/slides/2016/winter1516_lecture7.pdf.
31. Johnson, J. (2022). Convolutional Networks. Lecture slides for EECS 498, University of Michigan. Available at: https://web.eecs.umich.edu/~justincj/slides/eecs498/WI2022/598_WI2022_lecture07.pdf.
32. Dubey, S. R., Singh, S. K., & Chaudhuri, B. B. (2022). Activation functions in deep learning: A comprehensive survey and benchmark. *Neurocomputing*, vol. 503, pp. 92-108, arxiv.org/abs/2109.14545, DOI: 10.1016/j.neucom.2022.06.111.
33. Kunc, Vladimír, and Jiří Kléma. Three decades of activations: A comprehensive survey of 400 activation functions for neural networks. *arXiv preprint arXiv:2402.09092* (2024).
34. Fleuret, François. (n.d.). Pooling. Deep Learning Course, University of Geneva. Available at: <https://fleuret.org/dlc/materials/dlc-slides-4-5-pooling.pdf>.
35. Zhou, S. K., Rueckert, D., & Fichtinger, G. (Eds.). (2020). *Handbook of Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention*. Academic Press. ISBN: 978-0-12-816176-0.
36. Carranza-García, M.; Torres-Mateo, J.; Lara-Benítez, P.; García-Gutiérrez, J. On the Performance of One-Stage and Two-Stage Object Detectors in Autonomous Vehicles Using Camera Data. *Remote Sens.* 2021, 13, 89. <https://doi.org/10.3390/rs13010089>.
37. Обнаружение объектов на изображении [Электронный ресурс] : электрон. метод. указания к лаб. работе № 4 / М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т) ; [сост. В. В. Сергеев и др.]. - Самара, 2010. - on-line, <https://repo.ssau.ru/bitstream/Metodicheskie-ukazaniya/Obnaruzhenie-obektov-na-izobrazhenii-Elektronnyi-resurs-elektron-metod-ukazaniya-k-lab-rabote-4-53647/1/Сергеев%20В.В.%20Обнаружение%20объектов.pdf>.
38. Леонидов В. В. Корреляционный анализ: Конспект лекции по дисциплине «Цифровая обработка сигналов». М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020, <https://leonidov.su/wp-content/uploads/2020/04/Correlation-Lecture-V.V.-Leonidov.pdf>.
39. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. Издание 3-е, исправленное и дополненное. Москва: Техносфера, 2012. – 1104 с. ISBN: 978-5-94836-331-8.
40. Ященко А.В., Беликов А.В., Петерсон М.В., Потапов А.С. Дистилляция нейросетевых моделей для детектирования и описания ключевых точек изображений // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 3. С. 402–409. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-3-402-409.
41. Svoboda, T. (Ed.). (2000). Feature Point Detection in Multiframe Images. Czech Pattern Recognition Workshop 2000, 1-6. Czech Pattern Recognition Society.
42. Kondreddy, M. (2017). Image Recognition Techniques for Optical Head Mounted Displays. Master Thesis, Department of Computer Science, Technische Universität Chemnitz.
43. Lin, Bingxiong, et al. "Efficient Vessel Feature Detection for Endoscopic Image Analysis." *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 62, no. 4, April 2015, pp. 1141-1150, DOI: 10.1109/TBME.2014.2373273.
44. Chawla Pooja, Darshana Mistry and Bimal Kumar. "A Survey of Automatic Feature Based Image Registration Techniques." *IJSRD - International Journal for Scientific Research & Development*, vol. 2, no. 12, 2015, pp. 340-343, ISSN (online): 2321-0613.
45. Михальков, Федор Дмитриевич. Прецизионные быстродействующие мобильные видеоинформационные системы дополненной реальности : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.12.04 – радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения / Михальков Федор Дмитриевич; [Место защиты: Том. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники (ТУСУР) РАН]. — Томск, 2016. — 107 с.
46. Moravec H. Rover visual obstacle avoidance // Proc. Intl. Joint Conference on Artificial Intelligence. – 1981. – pp. 785-790.
47. Горитов А. Н. Сравнение методов выделения особых точек объектов на изображениях рабочей сцены робота-манипулятора / А. Н. Горитов, А. А. Бодрухин // Доклады ТУСУР. – 2019. – Т. 22, № 3. – С. 61–66. DOI: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-61-66.
48. Dey, N., et al. (2012). A Comparative Study between Moravec and Harris Corner Detection of Noisy Images Using Adaptive Wavelet Thresholding Technique. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, vol. 2, no. 1, pp. 599-606, ISSN: 2248-9622.
49. Edge Detection using Moravec Corner Detector // geeksforgeeks : [Электронный ресурс]. – 2024. – URL: <https://www.geeksforgeeks.org/edge-detection-using-moravec-corner-detector/> (дата обращения: 11.03.2025).
50. Moravec Corner Detection (Theory and Code) // codetipsacademy : [Электронный ресурс]. – 2024. – URL: <https://codetipsacademy.com/moravec-corner-detection/> (дата обращения: 11.03.2025).
51. Harris, C., & Stephens, M. "A Combined Corner and Edge Detector." *Proceedings of the Fourth Alvey Vision Conference*, 1988, pp. 147-151. DOI: 10.5244/C.2.23.
52. Компьютерное зрение и обработка изображений. Лекция 12. Детекторы и дескрипторы. Южный федеральный университет, Институт математики, механики и компьютерных наук // [edu.mmcs.sfedu.ru : \[Электронный ресурс\]](https://edu.mmcs.sfedu.ru/pluginfile.php/120277/mod_resource/content/4/Детекторы%20и%20дескрипторы.pdf). – 2019. – URL: https://edu.mmcs.sfedu.ru/pluginfile.php/120277/mod_resource/content/4/Детекторы%20и%20дескрипторы.pdf (дата обращения: 11.03.2025).

53. Python | Corner detection with Harris Corner Detection method using OpenCV // geeksforgeeks : [Электронный ресурс]. – 2023. – URL: <https://www.geeksforgeeks.org/python-corner-detection-with-harris-corner-detection-method-using-opencv/> (дата обращения: 12.03.2025).
54. How to implement Harris Corner Detector with Python // geekering : [Электронный ресурс]. – 2022. – URL: <https://www.geekering.com/programming-languages/python/brunorsilva/harris-corner-detector-python/> (дата обращения: 12.03.2025).
55. Детекторы углов // habr : [Электронный ресурс]. – 2014. – URL: <https://habr.com/ru/articles/244541/> (дата обращения: 17.04.2025).
56. Shi-Tomasi Corner Detector & Good Features to Track // docs.opencv.org : [Электронный ресурс]. – 2025. – URL: https://docs.opencv.org/3.4/d4/d8c/tutorial_py_shi_tomasi.html (дата обращения: 17.04.2025).
57. Jianbo Shi and Tomasi, "Good features to track," 1994 Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Seattle, WA, USA, 1994, pp. 593-600, doi: 10.1109/CVPR.1994.323794.
58. E. Angelopoulou, S. Gaffling. Computer Vision Exercise 5. Corner Detection. Pattern Recognition Lab, University of Erlangen-Nuremberg. Available: <https://www5.cs.fau.de/fileadmin/lectures/2014s/Lecture.2014s.CV/Exercise/ex5.pdf>.
59. M. Trajkovic, M. Hedley. Fast corner detection. Image and Vision Computing 16 (1998). pp. 75-87.
60. Förstner, W., & Gülch, E. (1987, June). A fast operator for detection and precise location of distinct points, corners and centres of circular features. In Proc. ISPRS intercommission conference on fast processing of photogrammetric data (pp. 281-305). Available: <https://cseweb.ucsd.edu/classes/sp02/cse252/foerstner/foerstner.pdf>.
61. Smith, S.M., Brady, J.M. SUSAN—A New Approach to Low Level Image Processing. International Journal of Computer Vision 23, 45–78 (1997). <https://doi.org/10.1023/A:1007963824710>.

Нечаев Александр Александрович
МФПУ «Синергия»,
аспирант
125315, г. Москва, Ленинградский проспект, д. 80
Тел. +79859655769
E-mail: nechaev1228@mail.ru

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

NECHAEV A.A., POLYAKOV R.N.

REVIEW OF IMAGE PROCESSING METHODS FOR OBJECT DETECTION USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS. PART 1

Annotation. The article provides an overview of the problem of detecting objects in an image. Several options for setting the problem, classifying the methods for solving it (into certain groups) are considered, and the main existing methods for solving it are described. The advantages and disadvantages of various methods are considered, various approaches are compared, and their advantages and disadvantages are highlighted. The article considers the development of methods for detecting objects over the past approximately forty years. The main ideas of the operation of both neural networks in general and convolutional neural networks in particular are described (since the highest performance in detecting objects was achieved by those methods that use convolutional neural networks). The problem of tracking objects is briefly considered, and some practical cases in which problems of detecting or tracking objects may arise are indicated. The article is published in two parts.

Keywords: digital image processing, object detection, object tracking.

BIBLIOGRAPHY

1. Verschae R and Ruiz-del-Solar J (2015) Object Detection: Current and Future Directions. Front. Robot. AI 2:29. doi: 10.3389/frobt.2015.00029
2. Lin T. Fast and Accurate Object Detection on Asymmetrical Receptive Field //arXiv preprint arXiv:2303.08995. – 2023.
3. M. Chinnarao, R. Goutham Sai Kalyan, T. Naga Pravallika, B. Srinivas, Object Detection Using Yolo And Tensor Flow, Int. J. in Engi. Sci., 2024, Vol 1, Issue 1, 13-23. <https://doi.org/10.5281/zenodo.11825059>
4. Yilmaz, A., Javed, O., and Shah, M. 2006. Object tracking: A survey. ACM Comput. Surv. 38, 4, Article 13 (Dec. 2006), 45 pages. DOI = 10.1145/1177352.1177355 <http://doi.acm.org/10.1145/1177352.1177355>
5. Z.-Q. Zhao, P. Zheng, S. -T. Xu and X. Wu. Object Detection With Deep Learning: A Review. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, vol. 30, no. 11, pp. 3212-3232, Nov. 2019, doi: 10.1109/TNNLS.2018.2876865.
6. Casado-García, Á., & Heras, J. (2020). Ensemble Methods for Object Detection. European Conference on Artificial Intelligence, 2688–2695. <https://doi.org/10.3233/FAIA200407>
7. R Mohan, Midhula Vijayan, Athira Ap, 2016, Object Detection and Tracking Techniques: A Survey, INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH & TECHNOLOGY (IJERT) ICACC – 2016 (Volume 4 – Issue 34), DOI: 10.17577/IJERTCONV4IS34001

8. Y. Wu, J. Lim and M. -H. Yang. Online Object Tracking: A Benchmark. 2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Portland, OR, USA, 2013, pp. 2411-2418, doi: 10.1109/CVPR.2013.312.
9. Rupesh Kumar Rout. A Survey on Object Detection and Tracking Algorithms. Thesis for the degree of Master Of Technology, National Institute of Technology Rourkela, 2013.
10. Z. Zou, K. Chen, Z. Shi, Y. Guo and J. Ye. Object Detection in 20 Years: A Survey. Proceedings of the IEEE, vol. 111, no. 3, pp. 257-276, March 2023, doi: 10.1109/JPROC.2023.3238524.
11. A. Krizhevsky, I. Sutskever, and G. E. Hinton. Imagenet classification with deep convolutional neural networks. Advances in neural information processing systems, 2012, pp. 1097-1105.
12. Nicholson, Lachlan, Michael Milford, and Niko Sünderhauf. Quadricslam: Dual quadrics from object detections as landmarks in object-oriented slam. IEEE Robotics and Automation Letters 4.1 (2018): 1-8.
13. Sal, Ferhat. A Survey on Object Detection Technologies And Convolutional Neural Networks For Robotics. Bogazici University, 2020.
14. Park, J.; Aryal, P.; Mandumula, S.R.; Asolkar, R.P. An Optimized DNN Model for Real-Time Inferencing on an Embedded Device. Sensors 2023, 23, 3992. <https://doi.org/10.3390/s23083992>
15. Skansi, Sandro. Introduction to Deep Learning: From Logical Calculus to Artificial Intelligence. Springer International Publishing AG, 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-73004-2. 196 p.
16. Fleuret, Francois. The Little Book of Deep Learning. Université de Genève, 2024, fleuret.org/public/lbdl.pdf.
17. Kamble, Sameer Baban, et al. Deep Learning: Semester IV (Subject Code: PSIT403a). Institute of Distance and Open Learning, University of Mumbai, 2022.
18. M. Anthony and P. L. Bartlett, Neural Network Learning: Theoretical Foundations, Cambridge: Cambridge University Press, 1999, 389 p. ISBN 978-0-521-57353-5, 978-0-521-11862-0.
19. Haykin, S. (2009). Neural networks and learning machines (3rd ed.). Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall. ISBN-13:978-0-13-147139-9.
20. Chan, Helsa. Numerical Study of a Partial Differential Equation Approach to Deep Neural Networks. Masters thesis, University of Waterloo, 2017.
21. Kim, Phil. MATLAB Deep Learning With Machine Learning, Neural Networks and Artificial Intelligence. Apress, 2017. ISBN-13 (electronic): 978-1-4842-2845-6. DOI: 10.1007/978-1-4842-2845-6.
22. Smets, Bart M. N. Mathematics of Neural Networks. Lecture notes, 12 Nov. 2022. arXiv:2403.04807v1.
23. Walker, Ian. Deep Convolutional Neural Networks for Brain Computer Interface using Motor Imagery. Masters thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London, 4 Sept. 2015.
24. LeCun, Y., Bottou, L., Bengio, Y., & Haffner, P. (1998). Gradient-based learning applied to document recognition. Proceedings of the IEEE, 86(11), pp. 2278–2324. doi:10.1109/5.726791.
25. Zhu, X., Xu, Y., Xu, H., & Chen, C. (2018). Quaternion convolutional neural networks. In Proceedings of the European conference on computer vision (ECCV) (pp. 631-647).
26. Aggarwal, C. C. (2018). Neural networks and deep learning: A textbook. Springer Nature Switzerland AG. 497 p. ISBN 978-3-319-94463-0 (eBook). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-94463-0>.
27. David H. Hubel and Torsten N. Wiesel. Receptive fields of single neurones in the cats striate cortex. The Journal of Physiology 148 (1959), pp. 574-591. DOI: 10.1113/jphysiol.1959.sp006308.
28. Fukushima, K. and Miyake, S. (1982). Neocognitron: A new algorithm for pattern recognition tolerant of deformations and shifts in position. Pattern Recognition, 15(6), 455–469. DOI: 10.1016/0031-3203(82)90024-3.
29. Lecture 6: The Convolutional Layer in Convolutional Networks. Lecture slides, KTH Royal Institute of Technology, 29 May 2017, www.kth.se/social/files/592c00bff2765477d817718f/Lecture6.pdf.
30. Li, F.-F., Karpathy, A., & Johnson, J. (2016). Convolutional Neural Networks [Lecture slides]. Stanford Vision and Learning Lab (SVL), Stanford University. https://cs231n.stanford.edu/slides/2016/winter1516_lecture7.pdf.
31. Johnson, J. (2022). Convolutional Networks. Lecture slides for EECS 498, University of Michigan. Available at: https://web.eecs.umich.edu/~justincj/slides/eecs498/WI2022/598_WI2022_lecture07.pdf.
32. Dubey, S. R., Singh, S. K., & Chaudhuri, B. B. (2022). Activation functions in deep learning: A comprehensive survey and benchmark. Neurocomputing, vol. 503, pp. 92-108, arxiv.org/abs/2109.14545, DOI: 10.1016/j.neucom.2022.06.111.
33. Kunc, Vladimír, and Jiří Kléma. Three decades of activations: A comprehensive survey of 400 activation functions for neural networks. arXiv preprint arXiv:2402.09092 (2024).
34. Fleuret, François. (n.d.). Pooling. Deep Learning Course, University of Geneva. Available at: <https://fleuret.org/dlc/materials/dlc-slides-4-5-pooling.pdf>.
35. Zhou, S. K., Rueckert, D., & Fichtinger, G. (Eds.). (2020). Handbook of Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention. Academic Press. ISBN: 978-0-12-816176-0.
36. Carranza-García, M.; Torres-Mateo, J.; Lara-Benítez, P.; García-Gutiérrez, J. On the Performance of One-Stage and Two-Stage Object Detectors in Autonomous Vehicles Using Camera Data. Remote Sens. 2021, 13, 89. <https://doi.org/10.3390/rs13010089>.
37. Sergeev, V.V. [et al.] (2010). Object detection in images [Electronic resource]: Electronic methodological guidelines for laboratory work No. 4. Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Samara State Aerospace University named after S.P. Korolev (National Research University). Samara. Retrieved from <https://repo.ssau.ru/bitstream/Metodicheskie-ukazaniya/Obnaruzhenie-obektov-na-izobrazhenii-Elektronnyi-resurs-elektron-metod-ukazaniya-k-lab-rabote-4-53647/1/Cepreen%20B.B.%20Обнаружение%20объектов.pdf>.
38. Leonidov, V.V. (2020). Correlation analysis: Lecture notes on "Digital Signal Processing". Moscow: Bauman Moscow State Technical University. Retrieved from <https://leonidov.su/wp-content/uploads/2020/04/Correlation-Lecture-V.V.-Leonidov.pdf>.
39. Gonzalez, R., & Woods, R. (2012). Digital image processing (3rd ed., rev. and exp.). Moscow: Technosphere. 1104 p. ISBN: 978-5-94836-331-8.

40. Yashchenko, A.V., Belikov, A.V., Peterson, M.V., & Potapov, A.S. (2020). Neural network model distillation for detection and description of image keypoints. Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 20(3), 402-409. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2020-20-3-402-409>.
41. Svoboda, T. (Ed.). (2000). Feature Point Detection in Multiframe Images. Czech Pattern Recognition Workshop 2000, 1-6. Czech Pattern Recognition Society.
42. Kondreddy, M. (2017). Image Recognition Techniques for Optical Head Mounted Displays. Master Thesis, Department of Computer Science, Technische Universität Chemnitz.
43. Lin, Bingxiong, et al. "Efficient Vessel Feature Detection for Endoscopic Image Analysis." IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. 62, no. 4, April 2015, pp. 1141-1150, DOI: 10.1109/TBME.2014.2373273.
44. Chawla Pooja, Darshana Mistry and Bimal Kumar. "A Survey of Automatic Feature Based Image Registration Techniques." IJSRD - International Journal for Scientific Research & Development, vol. 2, no. 12, 2015, pp. 340-343, ISSN (online): 2321-0613.
45. Mikhailkov, F.D. (2016). Precision high-speed mobile video information systems of augmented reality [PhD dissertation, Technical Sciences, Specialization 05.12.04 - Radio Engineering, including Television Systems and Devices]. Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR). Tomsk, Russia. 107 p.
46. Moravec H. Rover visual obstacle avoidance // Proc. Intl. Joint Conference on Artificial Intelligence. – 1981. – pp. 785-790.
47. Goritov, A.N., & Bodrukhin, A.A. (2019). Comparison of methods for extracting feature points of objects in images of a robotic manipulators workspace. TUSUR Reports, 22(3), 61-66. <https://doi.org/10.21293/1818-0442-2019-22-3-61-66>.
48. Dey, N., et al. (2012). A Comparative Study between Moravec and Harris Corner Detection of Noisy Images Using Adaptive Wavelet Thresholding Technique. International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), vol. 2, no. 1, pp. 599-606, ISSN: 2248-9622.
49. Edge Detection using Moravec Corner Detector // geeksforgeeks : [Electronic resource]. – 2024. – URL: <https://www.geeksforgeeks.org/edge-detection-using-moravec-corner-detector/> (дата обращения: 11.03.2025).
50. Moravec Corner Detection (Theory and Code) // codetipsacademy : [Electronic resource]. – 2024. – URL: <https://codetipsacademy.com/moravec-corner-detection/> (дата обращения: 11.03.2025).
51. Harris, C., & Stephens, M. "A Combined Corner and Edge Detector." Proceedings of the Fourth Alvey Vision Conference, 1988, pp. 147-151. DOI: 10.5244/C.2.23.
52. Computer Vision and Image Processing. Lecture 12. Detectors and Descriptors. Southern Federal University, Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science [Website]. (2019). Retrieved March 11, 2025, from https://edu.mmcs.sfedu.ru/pluginfile.php/120277/mod_resource/content/4/Детекторы%20и%20дескрипторы.pdf.
53. Python | Corner detection with Harris Corner Detection method using OpenCV // geeksforgeeks : [Electronic resource]. – 2023. – URL: <https://www.geeksforgeeks.org/python-corner-detection-with-harris-corner-detection-method-using-opencv/> (дата обращения: 12.03.2025).
54. How to implement Harris Corner Detector with Python // geekering : [Electronic resource]. – 2022. – URL: <https://www.geekering.com/programming-languages/python/brunorsilva/harris-corner-detector-python/> (дата обращения: 12.03.2025).
55. Corner Detectors [habr website]. (2014). Retrieved April 17, 2025, from <https://habr.com/ru/articles/244541/>.
56. Shi-Tomasi Corner Detector & Good Features to Track // docs.opencv.org : [Electronic resource]. – 2025. – URL: https://docs.opencv.org/3.4/d4/d8c/tutorial_py_shi_tomasi.html (дата обращения: 17.04.2025).
57. Jianbo Shi and Tomasi, "Good features to track," 1994 Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Seattle, WA, USA, 1994, pp. 593-600, doi: 10.1109/CVPR.1994.323794.
58. E. Angelopoulou, S. Gaffling. Computer Vision Exercise 5. Corner Detection. Pattern Recognition Lab, University of Erlangen-Nuremberg. Available: <https://www5.cs.fau.de/fileadmin/lectures/2014s/Lecture.2014s.CV/Exercise/ex5.pdf>.
59. M. Trajkovic, M. Hedley. Fast corner detection. Image and Vision Computing 16 (1998). pp. 75-87.
60. Förstner, W., & Gülch, E. (1987, June). A fast operator for detection and precise location of distinct points, corners and centres of circular features. In Proc. ISPRS intercommission conference on fast processing of photogrammetric data (pp. 281-305). Available: <https://cseweb.ucsd.edu/classes/sp02/cse252/foerstner/foerstner.pdf>.
61. Smith, S.M., Brady, J.M. SUSAN—A New Approach to Low Level Image Processing. International Journal of Computer Vision 23, 45–78 (1997). <https://doi.org/10.1023/A:1007963824710>.

Nechaev Alexandr Alexandrovich

MFIU Synergy
postgraduate student
125315, Moscow, Leningradsky Prospekt, 80
Ph.: +79859655769
E-mail: nechaev1228@mail.ru

Polyakov Roman Nikolaevich

Orel State University named after I.S. Turgenev
doctor of technical Sciences, Head of the department
mechatronics, mechanics and robotics
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
Ph.:+79038819381

© Нечаев А.А., Поляков Р.Н., 2025

ПАНКОВА К.В., МАСЛОВ А.И., ЛИЗУНОВ А.А.

АНАЛИЗ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И МОДЕЛЬ ИСПЫТАНИЙ КРУПНОГАБАРИТНОЙ УПЛОТНИТЕЛЬНОЙ МАНЖЕТЫ В СОСТАВЕ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Аннотация. Рассмотрен один из способов старта летательного аппарата (ЛА) – миномётный, с выделением его особенностей и спецификой устройства его реализации - обтюратора. Проанализировано функционирование и условия эксплуатации крупногабаритной уплотнительной манжеты в составе обтюратора стартово-разгонной ступени (СРС) ЛА, обеспечивающая важную задачу - защиту двигателя маршевой ступени (ДМС) от горячих газов двигательной установки (ДУ) СРС и аккумулирование избыточного давления при миномётном старте. Изучены нормативные требования к ракетно-космической технике (РКТ). Предложена и обоснована модель научно-исследовательских испытаний критического элемента обтюратора – крупногабаритной уплотнительной при миномётном старте, учитывающая взаимное влияние составных частей ЛА и транспортно-пускового стакана (ТПС), позволяющая выдавать заключение о готовности элемента к безаварийной и стабильной работе в составе ЛА.

Ключевые слова: уплотнительная манжета, обтюратор, стартово-разгонная ступень, миномётный старт.

Введение

Эволюция РКТ движется по нескольким путям направлениям – повышение универсальности, уменьшение массогабаритных характеристик и снижение затрат на производство и эксплуатацию, а одним из способов соблюдения всех путей развития является совершенствование старта и устройств его реализующих. Разработка безотказного старта ЛА из ТПС была и остается на сегодняшний день одной из актуальных при проектировании, изготовлении, эксплуатации РКТ. Среди всего разнообразия способов запуска ЛА особый интерес вызывает миномётный старт из ТПС как один из наиболее эффективных и безопасных как для наземных, так и для морских носителей. Поэтому все ЛА необходимо проектировать с учетом действующих факторов на определяющие элементы при старте ЛА из ТПС для эффективного и безаварийного функционирования при заданных рабочих режимах [1].

Иновационный метод выбрасывания ЛА под действием пороховых газов газогенератором – миномётный старт, был придуман в СССР академиком М.К. Янгелем [2]. Для аккумулирования избыточного давления, создаваемого газогенераторами старта предложено использовать резиноподобные обтюрирующие устройства, размещенные между внутренними стенками далее ТПС и корпусом ЛА. Данный способ был взят на вооружение многими конструкторскими бюро страны, в том числе главным конструктором НПО машиностроения В.Н. Челомеем, развившим данное направление применив миномётный старт для ЛА, разработанных в его конструкторском бюро.

1. Концепция минометного старта ЛА

Исследуемый способ старта обладает несомненными достоинствами такими как:

- малые габариты стартового устройства;
- возможность размещения на практически любых носителях;
- экономия топлива;
- меньшая аварийность по сравнению со схемой «горячего» старта;
- снижение тепловой нагрузки на ЛА.

Одним из самых важных превосходств данного старта является его универсальность, т.е. при ограниченных размерах и конструктивно-технологических возможностях носителя он позволяет размещать ЛА под водой, над водой и на береговых комплексах. При этом существуют несколько вариантов исполнения обтюрирующего устройства: являющимся частью ТПС, частью ЛА или одновременно конструктивно связанным с ЛА и ТПС. На изделиях, разрабатываемых АО «ВПК «НПО машиностроения» для создания избыточного давления используются пороховые аккумуляторы давления (ПАД), размещаемые в днище

ТПС, а для аккумулирования давления - часть СРС – обтюрирующий пояс, устанавливаемый на ДУ СРС, состоящий из опор, обтекателей и крупногабаритной уплотнительной манжеты (рисунок 1).

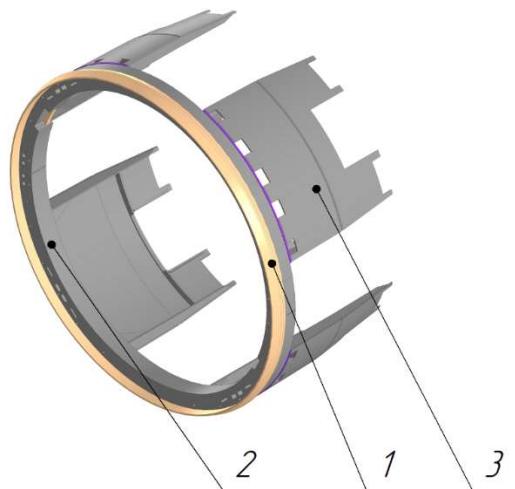


Рисунок 1 - Обтюрирующий пояс СРС ЛА:

1 – крупногабаритная уплотнительная манжета; 2 – опоры (внутренняя и внешняя); 3 – обтекатели

Крупногабаритная уплотнительная манжета, установленная на обтюрирующем устройстве СРС ЛА и непосредственно контактирующая с ТПС является одним из элементов, определяющим успешность выполнения старта, а, следовательно, задачи ЛА. Разработка ее внешнего облика и проектной геометрии, выбор используемого материала является актуальной задачей для обеспечения выполнения минометного старта ЛА, так как именно она обеспечивает возможность накопления, удерживания и распределение стартового давления, являющегося движущей силы ЛА вдоль ТПС.

Несмотря на многолетнее использование минометного старта для ЛА, запрос на продление гарантийных сроков, стоящих на боевом дежурстве ЛА и разработка нового вооружения ставит задачи определения и подтверждения работоспособности эластичной профилированной неметаллической уплотнительной манжеты в составе обтюрирующего пояса для новых условий эксплуатаций. Так как, даже достаточная проработка методов расчета уплотнительных манжет, наличие исследований их работы в составе обтюратора не дает полной систематизированной информации и рекомендаций по выбору схемных решений, режимных параметров и по расчету потенциала эффективности, поэтому **целью исследования является** – создание модели методики подтверждения функционирования уплотнительной манжеты в составе обтюратора СРС. Для этого определены следующие задачи исследования:

- определение границ работоспособности и оценки соответствия характеристик объекта испытаний требованиям технического задания по результатам испытаний;
- изучение взаимного влияния составных частей системы, механизма;
- уточнение режимов испытаний и условий работы составных частей при их совместном функционировании;
- выдача заключения о готовности объекта к дальнейшим испытаниям

2. Анализ работы уплотнительной манжеты

Анализ работы уплотнительной манжеты включает в себя комплексный подход к решению рассматриваемого узла, так как приходится оперировать большой массой информации для расчетных и экспериментальных исследований. Эффективность предлагаемой уплотнительной манжеты определяется при задании требуемого давления и температуры, и возможного смещения при установке ее на обтюратор либо в процессе движения СРС вдоль направляющих ТПС.

В связи с изложенным весьма актуальным становится исследование влияние на работу СРС ЛА эксплуатационных и технологических факторов, согласно рисунку 2 [3].

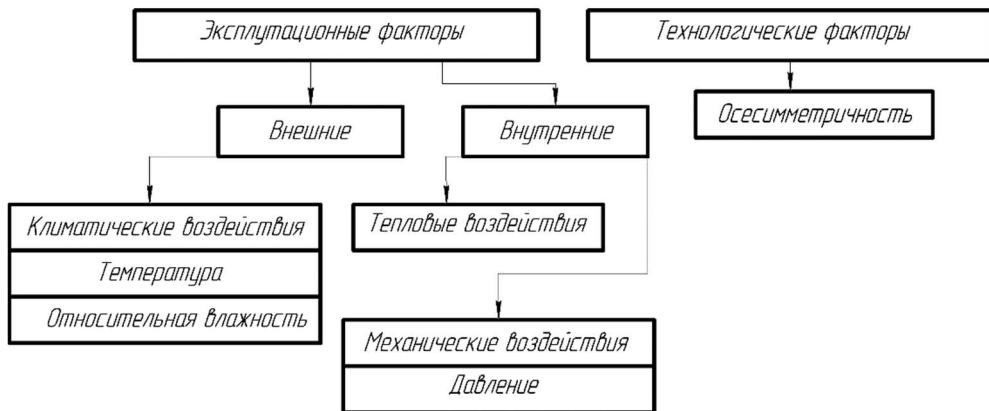


Рисунок 2 - Факторы, влияющие на функционирование элемента

При этом испытания на тепловые воздействия при эксплуатации в составе ЛА необходимы для оценки влияния температуры газа при запуске ПАД, продуктов сгорания от ДМТ. Данные испытания, как правило, проводятся комплексно, при этом с учетом кратковременности температурного воздействия (менее 0,5 с.) ими можно пренебречь, так как процесс пиролиза (температура термического разложения) у эластичных полимерно композиционных материалов, используемых для изготовления уплотнительной манжеты, не успевает пройти. Механическое воздействие в виде избыточного давления возникают при пуске ЛА в результате возникновения поршневой силы от систем старта, влияющие на конструкцию уплотнительной манжеты, отжимая или сжимая ее, что влечет за собой потерю герметичности и аварийную ситуацию. Воздействие абсолютного давления возникает при пуске ЛА из подводного положения при выбросе и движении в свободной воде.

Также в период эксплуатации и хранения климатическое воздействие может приводить к образованию дефектов и значительных повреждений, приводящие к дальнейшему выхода из строя этого элемента [4]. Следовательно, техническая готовность уменьшается, и надежность стремится к нулю.

Через обтюрирующий пояс проходят системы и узлы, входящие в состав изделия, конструктивно-технологически связанные с уплотнительной манжетой, проходящие через ее тело, которые необходимо учитывать для адекватной и полной оценки работоспособности элемента. Для обеспечения выполнения уплотнительной манжетой своих функций определены составные части (СЧ), необходимую учитывать для совместной отработки с обтюрирующим поясом: тяги сис-мы управления газовыми рулями и гребенка сис-мы наддува (рисунок 3).

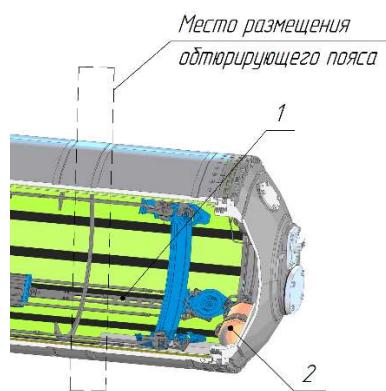


Рисунок 3 – Расположение обтюрирующего пояса и других составных частей:
1 – тяги сис-мы управления газовыми рулями; 2 – сис-ма наддува

При установке обтюрирующего пояса на СРС и заводке в ТПС необходимо учитывать возможность допустимого отклонения осесимметричности обтюрирующего пояса при заводке ЛА в ТПС, составляющие от 0 до 2,5 °.

3. Анализ методик и способов испытаний проверки функционирования уплотнительных манжет

Отработка составных частей ракетно-космической техники на надежность и стойкость функционирования является обязательным условием для подтверждения выбранного конструкторского решения, при этом, для уменьшения объема летных испытаний необходимо оценивать взаимодействия конструктивно связанных между собой элементов (уплотнительная манжета, установленная на обтюраторе, с ТПС и СЧ) и выявление отказов, вызванных особенностями конструкции [5].

Основным требованием при этом является повышение достоверности информации о характеристиках изделия и его систем, получаемых на различных уровнях иерархии наземных испытаний, приводящихся в имитируемых условиях реальной эксплуатации.

Для подтверждения выбранной геометрии и материала уплотнительной манжеты необходимо создание модели испытаний, учитывающей условия функционирования на изделии. Анализ работы обтюрирующей манжеты, приведенный выше задает следующие цели и задачи натурных испытаний:

- подтверждение работоспособности обтюрирующей манжеты на обтюраторе при эксплуатации изделия;
- уточнение характеристик обтюрирующей манжеты, использующихся при расчетах и проектировании.

Был изучен задел существующих методик испытаний эластичных профилированных неметаллических манжет. [6, 7] Общим сходством для всех способов является проверка на герметичность, однако согласно ГОСТ Р В 0015-210-2020 опытные образцы изделия, предназначенные для работы совместно с другими изделиями, не входящими в их состав, испытывают в функциональной связи с этим изделием или их эквивалентами, поэтому в методике необходимо учитывать ее взаимосвязь с обтюратором, так как манжета должна удовлетворять условиям герметичности при продольном движении вдоль ТПС, исключающим выворачивание элемента и смещение ее на обтюраторе [8].

Объект исследований (испытаний) должны соответствовать нормативной документации ГОСТ 15150-69, ГОСТ Р В 15.203-2001, ГОСТ 9.707-81, ГОСТ 9.713-86, определяющие климатическую зону мест базирования ЛА, порядок испытаний, параметры проведения ускоренного термостарения при заданной температуре и относительной влажности [9, 10, 11, 12].

4. Модель испытания уплотнительной манжеты обтюратора СРС ЛА

Для выполнения указанных выше требований были определены основные испытания:

- определение сопротивления элемента при заводке в ТПС;
- испытания на герметичность при заданных по техническому заданию температурах и давлению;
- ускоренное термостарения при заданной температуре и относительной влажности;
- испытания на герметичность при заданных по техническому заданию климатических условиях и давлению после ускоренных испытаний на хранение;
- определение механических свойств элемента для оценки структурных изменений.

При этом для соблюдения концепции оптимизации испытаний необходимо максимально заменить входящие СЧ на имитаторы при обязательном выполнении условия обеспечения конструктивного и технологического подобия. В рассматриваемом случае входимые СЧ других узлов ЛА, таких как: корпус ДУ СРС, корпус ТПС, тяги сис-мы управления газовыми рулями ЛА, гребенка сис-мы наддува заменены на имитаторы. При затягивании обтюратора с уплотнительной манжетой, установленной на имитатор ДУ СРС, необходимо регистрировать сопротивления уплотнительной манжеты. Испытания на герметичность путем подачи давления в полость между обтюратором и имитатором ТПС с контролем падения давления в полости по результатам которого делается вывод об успешности функционирования уплотнительной манжеты на обтюраторе, определен род

пробного вещества – газовый, метод – манометрический, способ реализации метода – компрессионный. Климатические испытания путем помещения стенда в климатическую камеру, имитирующие хранение на открытых площадках при температуре окружающего воздуха от минус 50 до плюс 50 °С и относительной влажности не более 98 % в течение 7 лет. Подтверждение заданной герметичности с учетом входящих СЧ, а именно гребенки сис-мы наддува.

Процессом испытаний можно управлять с помощью изменений следующих параметров: давлением подаваемой в полость обтюратора p_i , расстоянием между поршнем и верхним торцом стакана l_i , температурой испытаний T_i [4].

Предложена методика испытаний, модель которой представлена на рисунке 4, она включает в себя перечисленные выше процедуры, а также различные технологические моменты, например, внешний осмотр элемента перед установкой на изделие на наличие отслоений, расслоений, трещин, посторонних включений, неоднородностей, нанесение тонкого слоя смазки, защищающего от внешних климатических факторов и т.д.

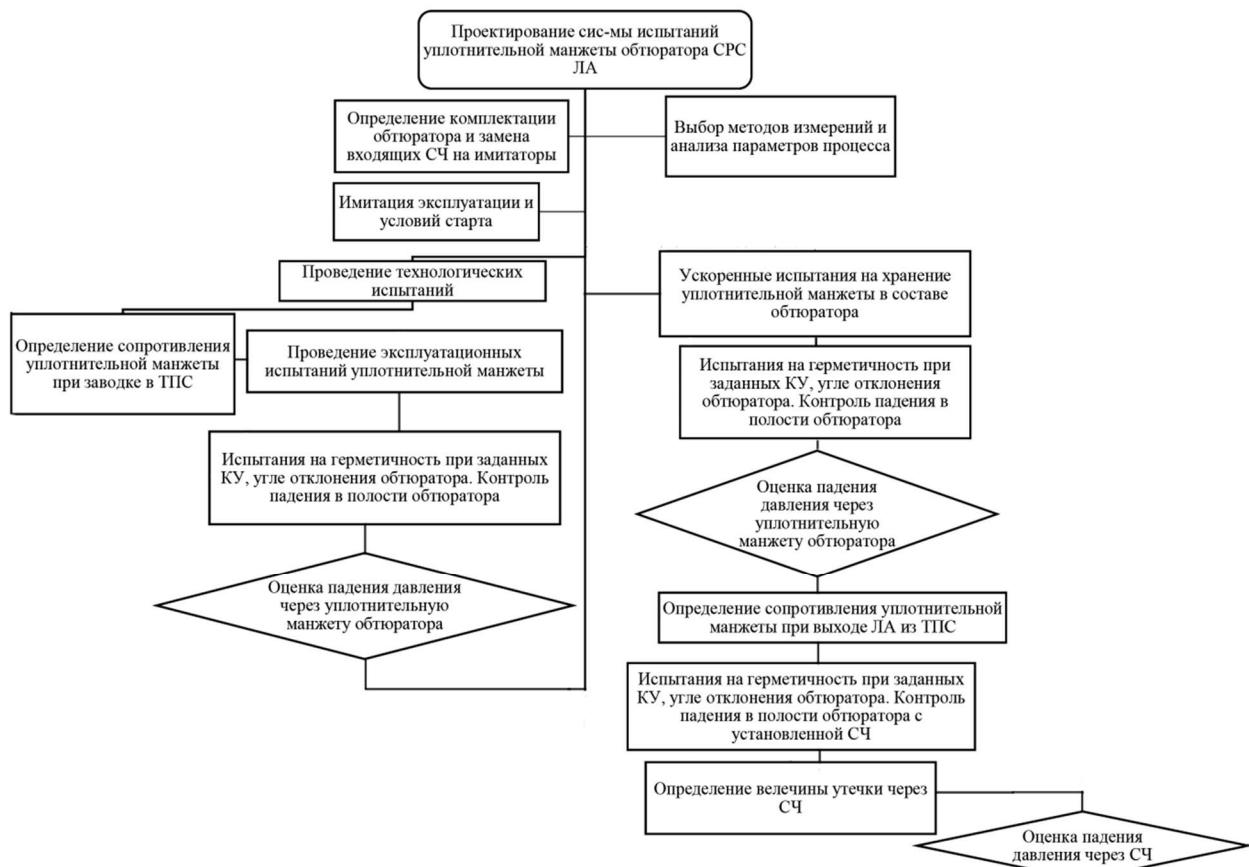


Рисунок 4 - Модель испытаний уплотнительной манжеты обтюратора

Заключение

Создание перспективных ЛА невозможно без обеспечения надежной работы его СЧ, в том числе обтюрирующего пояса в условиях высоких давлений и заданных температур эксплуатаций. Таким образом, на основании выполненных исследований была разработана модель испытаний, позволяющая выполнять экспериментальную отработку, предусматривающая проверку важнейших характеристик изделия при крайних пределах внешних нагрузок. Разработанная модель испытаний позволяет повысить достоверность информации о характеристиках уплотнительной манжеты, установленной на обтюраторе СРС, получаемых на различных уровнях иерархии наземных испытаний, приводящихся в имитируемых условиях реальной эксплуатации и служит заделом для разработки испытательного стенда данного элемента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ воздействия старта летательного аппарата из транспортно-пускового стакана на уплотнительный элемент обтюратора стартово-разгонной ступени / К.В. Панкова, А.А. Лизунов, А.И. Маслов [и др.] // Молодежь. Техника. Космос: труды пятнадцатой общероссийской молодёжной науч.-техн. конф. в 4 т. – СПб : Издательство Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова. – 2023. – Т.1. – С.12-14.
2. Андреев, Л.В. Янгель : Уроки и наследие / Л. В. Андреев, С. Н. Конюхов. – Днепропетровск : Арт-пресс, 2001. – 521 с.
3. Панкова, К.В., Лизунов, А.А., Маслов, А.И. [и др.] О.В. Особенности эксплуатационных факторов уплотняющих внешних резиновых элементов летательного аппарата // Вопросы оборонной техники, научно-технический журнал. Серия №15. Композиционные материалы в машиностроении – М. : «АО «Красная Звезда»» – 2024 – Вып. 3(212) – С. 80-83.
4. Мелькумова, Т. В. Старение резинотехнических изделий в процессе их хранения / Т. В. Мелькумова. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2017. – № 11.3 (145.3). – С. 33-35.
5. Мельников, И. В. Роль испытаний в оптимизации процесса проектирования изделий ракетно-космической техники / И. В. Мельников. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2011. – № 2 (25). – Т. 1. – С. 38-41.
6. Устройство для контроля герметичности резиновых манжет для валов: пат. 2025682 Рос. Федерации : МПК⁷ G 01 M 3/02 / С.Г. Межов, О.Г. Лысенко, О.М. Косенко [и др.] – N 5035343/28; заявл. 01.04.1992 ; опубл. 30.12.1994 – 6 стр. ; ил.
7. Способ контроля герметичности резиновых манжет для вращающихся валов. а.с. 1280362 СССР. : МПК⁷ G 01 M 3/26 / В.С. Юровский, В.К. Коморницкий-Кузнецов, Е. А. Ачеркан [и др.] – N 3939600; заявл. 06.08.1985 : опубл. 30.12.1986 – 3 стр. ; ил.
8. ГОСТ РВ 0015-210. СРПП военной техники. Испытания опытных образцов изделий и опытных ремонтных образцов изделий. Основные положения, дата введения 01.07.2021.
9. ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды, дата введения 01.01.1971. – М.: Стандартинформ, 2010. – 12 с.
10. 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, дата введения 01.01.2003. – М.: Госстандарт России.
11. ГОСТ 9.707-81. Единая система защиты от коррозии и старения. Материалы полимерные. Методы ускоренных испытаний на климатическое старение, дата введения 01.01.1983. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 82 с.
12. ГОСТ 9.713-86. Единая система защиты от коррозии и старения резины. Метод прогнозирования изменения свойств при термическом старении, дата введения 01.01.1988. М.: Издательство стандартов, 1987. – 10 с.

Панкова Ксения Викторовна
АО «ВПК «НПО
машиностроения», г. Реутов
инженер-конструктор I категории
143960, г. Реутов, ул. Гагарина, 33
Тел.: +7(495)528-46-13

Лизунов Андрей Аркадьевич
АО «ВПК «НПО
машиностроения», г. Реутов
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник
143960, г. Реутов, ул. Гагарина, 33

Маслов Александр Иванович
АО «ВПК «НПО
машиностроения», г. Реутов
доктор технических наук,
профессор, заместитель
руководителя службы качества по
НИОКР
143960, г. Реутов, ул. Гагарина,
33

PANKOVA K.V., MASLOV A.I., LIZUNOV A.A.

ANALYSIS OF THE FUNCTIONING AND TEST MODEL OF A LARGE-SIZED SEALING SLEEVE IN AN AIRCRAFT

Annotation. One of the ways of launching an aircraft (aircraft) is considered – mortar, highlighting its features and the specifics of its implementation device - an obturator. The functioning and operating conditions of a large-sized sealing sleeve as part of the obturator of the launch and acceleration stage (SRS) of the aircraft are analyzed, which provides an important task - protecting the engine of the main stage (VMS) from the hot gases of the SRS propulsion system and accumulating excess pressure during a mortar launch. The regulatory requirements for rocket and space

technology (RCT) have been studied. A model of scientific and research tests of a critical element of the obturator, a large-sized sealing during mortar launch, is proposed and substantiated, taking into account the mutual influence of the components of the aircraft and the transport and launch cup (TPS), which makes it possible to issue a conclusion on the elements readiness for trouble-free and stable operation as part of the aircraft.

Keywords: sealing sleeve, obturator, booster stage, mortar launch.

BIBLIOGRAPHY

1. Analiz vozdejstviya starta letatelnogo apparata iz transportno-puskovogo stakana na uplotnitelnyj element obtyuratora startovo-razgonnoj stupeni / K.V. Pankova, A.A. Lizunov, A.I. Maslov [i dr.] // Molodezh. Tekhnika. Kosmos: trudy pyatnadcatoj obshcherossijskoj molodyozhnoj nauchn.-tekhn. konf. v 4 t. - SPb : Izdatelstvo Baltijskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta «VOENMEH» im. D.F. Ustinova. - 2023. - T.1. - S.12-14.
2. Andreev, L.V. Yangel : Uroki i nasledie / L. V. Andreev, S. N. Konyuhov. - Dnepropetrovsk : Art-press, 2001. - 521 s.
3. Pankova, K.V., Lizunov, A.A., Maslov, A.I. [i dr.] O.V. Osobennosti ekspluatacionnyh faktorov uplotnyayushchih vneshnih rezinovyh elementov letatelnogo apparata // Voprosy oboronnoj tekhniki, nauchno-tehnicheskij zhurnal. Seriya №15. Kompozicionnye materialy v mashinostroenii - M. : «AO «Krasnaya Zvezda»» - 2024 - Vyp. 3(212) - S. 80-83.
4. Melkumova, T. V. Starenie rezinotekhnicheskikh izdelij v processe ih hraneniya / T. V. Melkumova. — Tekst : neposredstvennyj // Molodoj uchenyj. - 2017. - № 11.3 (145.3). - S. 33-35.
5. Melnikov, I. V. Rol ispytanij v optimizacii processa proektirovaniya izdelij raketno-kosmicheskoy tekhniki / I. V. Melnikov. - Tekst : neposredstvennyj // Molodoj uchenyj. - 2011. - № 2 (25). - T. 1. S. 38-41.
6. Ustrojstvo dlya kontrolya germetichnosti rezinovyh manzhet dlya valov: pat. 2025682 Ros. Federaciya : MPK⁷ G 01 M 3/02 / S.G. Mezhov, O.G. Lysenko, O.M. Kosenko [i dr.] - N 5035343/28; zayavl. 01.04.1992 ; opubl. 30.12.1994 - 6 str. ; il.
7. Sposob kontrolya germetichnosti rezinovyh manzhet dlya vrashchayushchihsya valov. a.s. 1280362 SSSR. : MPK⁷ G 01 M 3/26 / V.S. Yurovskij, V.K. Komornickij-Kuznecov, E. A. Acherkan [i dr.] - N 3939600; zayavl. 06.08.1985 : opubl. 30.12.1986 - 3 str. ; il.
8. GOST RV 0015-210. SRPP voennoj tekhniki. Ispytaniya optytnyh obrazcov izdelij i optytnyh remontnyh obrazcov izdelij. Osnovnye polozheniya, data vvedeniya 01.07.2021.
9. GOST 15150-69. Mashiny, pribory i drugie tekhnicheskie izdeliya. Ispolneniya dlya razlichnyh klimaticheskih rajonov. Kategorii, usloviya ekspluatatsii, hraneniya i transportirovaniya v chasti vozdejstviya klimaticheskih faktorov vneshnej sredy, data vvedeniya 01.01.1971. - M.: Standartinform, 2010. - 12 s.
10. GOST RV 15.203-2001. Sistema razrabotki i postanovki produkcii na proizvodstvo. Voennaya tekhnika. Poryadok vypolneniya optytno-konstruktorskikh rabot po sozdaniyu izdelij i ih sostavnnyh chastej, data vvedeniya 01.01.2003. - M.: Gosstandart Rossii.
11. GOST 9.707-81. Edinaya sistema zashchity ot korrozii i stareniya. Materialy polimernye. Metody uskorennyyh ispytanij na klimaticheskoe starenie, data vvedeniya 01.01.1983. - M.: Izdatelstvo standartov, 1990. - 82 s.
12. GOST 9.713-86. Edinaya sistema zashchity ot korrozii i stareniya reziny. Metod prognozirovaniya izmeneniya svojstv pri termicheskem starenii, data vvedeniya 01.01.1988. M.: Izdatelstvo standartov, 1987. - 10 s.

Pankova Ksenia Viktorovna
JSC «Military Industrial Complex
NPO Mashinostroenie», Reutov
design engineer of the I category
143960, Reutov, Gagarin St. 33
Phone: +7(495)528-46-13

Lizunov Andrey Arkadyevich
JSC «Military Industrial Complex
NPO Mashinostroenie», Reutov
candidate of Technical Sciences,
Leading Researcher
143960, Reutov, Gagarin St. 33

Maslov Alexander Ivanovich
JSC «Military Industrial Complex
NPO Mashinostroenie», Reutov
doctor of Technical Sciences,
Professor, Deputy Head of the
Quality Service for R&D
143960, Reutov, Gagarin St. 33

© Панкова К.В., Маслов А.И., Лизунов А.А., 2025

ТРУФАНОВ Ф.А., ПОЛЯКОВ Р.Н.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМА УГЛОВОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ В СОСТАВЕ ЭКЗОСКЕЛЕТА

Аннотация. Роботизированные экзоскелеты повышают эффективность реабилитации детей с детским церебральным параличом (ДЦП), но традиционные алгоритмы управления не всегда адаптируются к индивидуальной спастичности и требуют сложных сенсоров, таких как электромиография (EMG). Предложен адаптивный алгоритм управления, использующий ток привода как индикатор намерения движения для персонализированной коррекции траекторий коленного сустава. Алгоритм, связывающий сигнал датчика обратной связи с управляющим воздействием, разработан через динамическое моделирование и симуляцию в Python, демонстрируя снижение среднеквадратичной ошибки (RMSE) на 20% по сравнению с PID-контроллером. Подход исключает EMG, упрощая сенсорику и снижая потенциальную стоимость систем на 15–20%. Результаты подчеркивают перспективы токового управления для доступных и персонализированных экзоскелетов.

Ключевые слова: экзоскелет, детский церебральный паралич, реабилитация, адаптивное управление, ток привода, биомеханика.

Введение

Детский церебральный паралич (ДЦП) затрагивает около 17 миллионов человек, являясь ведущей причиной двигательных нарушений у детей [1]. Спастичность, мышечная слабость и нарушение координации ограничивают самостоятельную ходьбу. Роботизированные экзоскелеты, такие как Lokomat и ExoAtlet, улучшают длину шага на 20–30% за 8–12 недель тренировок [2]. Однако традиционные алгоритмы управления (позиционное, импедансное) плохо адаптируются к индивидуальным особенностям, например, динамической спастичности, и зависят от сложных сенсоров, таких как EMG, увеличивающих стоимость и чувствительность к шумам [3].

Предложен адаптивный алгоритм управления, использующий ток привода как индикатор намерения движения. Сигнал тока связывается с управляющим воздействием через адаптивный механизм, приближающий движения коленного сустава ребенка с ДЦП к здоровой походке. В отличие от EMG, ток привода – надежный и экономичный датчик обратной связи. Цель исследования – разработка адаптивного алгоритма управления экзоскелетом для персонализированной коррекции движений коленного сустава на основе тока привода. Задачи: анализ существующих методов, создание математической модели сустава, разработка алгоритма с пороговым значением тока и оценка эффективности через симуляцию. Работа выполнена в виртуальной среде с использованием биомеханически достоверных моделей [6], что оправдано отсутствием доступа к прототипам, и направлена на повышение доступности реабилитационных технологий.

Основная часть

Роботизированные экзоскелеты для реабилитации детей с детским церебральным параличом (ДЦП) используют различные алгоритмы управления, направленные на восстановление двигательных функций. Основные подходы – позиционное, импедансное и моментное управление – различаются по точности, сенсорным требованиям и способности адаптироваться к индивидуальным особенностям пациентов, таким как спастичность или мышечная слабость. Сравнение этих методов представлено в таблице 1, данные для которой основаны на анализе технических характеристик устройств и результатов их применения в реабилитации [1–3, 5].

Позиционное управление, реализованное в Lokomat, задает фиксированные траектории суставов с помощью PID-контроллеров. Однако оно не адаптируется к динамической спастичности, что приводит к отклонениям от целевой траектории до 15–20% при резких мышечных сокращениях, характерных для ДЦП [1]. Кроме того, PID-контроллеры требуют предварительной калибровки под каждого пациента, что усложняет персонализацию и увеличивает время настройки системы, особенно для детей с тяжелыми формами ДЦП.

Импедансное управление, применяемое в HAL, регулирует жесткость и податливость суставов на основе сигналов электромиографии (EMG). Этот метод более гибок, но EMG-сигналы подвержены шумам (до 10% амплитуды из-за пота, смещения датчиков или мышечной слабости), а необходимость множества сенсоров увеличивает стоимость системы на 20–30% и усложняет эксплуатацию в домашних условиях [2]. Моментное управление, используемое в EksoNR, корректирует усилие приводов по данным датчиков силы, обеспечивая естественные движения. Однако высокая точность сенсоров повышает энергопотребление (на 10–15% выше, чем у позиционного управления) и сложность конструкции, что ограничивает доступность для небольших клиник [3].

Таблица 1 – Сравнение существующих алгоритмов управления экзоскелетами

Алгоритм	Точность (RMSE, рад)	Сенсоры	Адаптивность	Пример устройства
Позиционное	0.15	Энкодеры	Низкая	Lokomat [1]
Импедансное	0.13	EMG, IMU	Средняя	HAL [2]
Моментное	0.14	Датчики силы	Средняя	EksoNR [3]

Предложенный подход использует ток привода (I_m) как индикатор намерения движения, связывая сигнал датчика обратной связи с управляющим воздействием для персонализированной коррекции траекторий коленного сустава. В статичном положении ток минимален ($I_m \approx I_{min} = 0.5\text{A}$); усилие пациента увеличивает I_m до 1.0–2.0 А пропорционально моменту (τ_p). При снижении усилия пациента ($I_m < I_{min} + \Delta I$, например, 0.5 А) алгоритм увеличивает момент привода (τ_m) для компенсации, поддерживая траекторию $\theta(t)$ близкой к эталонной $\theta_{ref}(t)$. Этот метод упрощает сенсорику, исключая необходимость в EMG, и снижает потенциальную стоимость системы. Динамика коленного сустава описывается уравнением:

$$I\ddot{\theta} + b\dot{\theta} + k\theta = \tau_m + \tau_p + \tau_s \quad (1)$$

где θ – угол сгибания сустава,
 $I = 0.02 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ – момент инерции,
 $b = 0.1 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}$ – коэффициент демпфирования,
 $k = 5 \text{ Н}/\text{м}$ – жесткость,
 τ_m – момент привода,
 τ_p – момент пациента,
 τ_s – спастичность.

Параметры I , b , k выбраны на основе биомеханических данных для детей 5–12 лет с ДЦП, учитывающих массу ноги (около 2–3 кг) и типичные угловые ускорения (до 10 рад/с²) [5]. Спастичность при ДЦП проявляется как случайные всплески мышечного тонуса с амплитудой до 20% от максимального момента, что требует адаптивных алгоритмов для компенсации резких изменений [4]. Эталонная траектория $\theta_{ref}(t)$ моделируется как синусоидальная функция с частотой 0.5–1 Гц, соответствующая нормальной походке ребенка, с амплитудой 0–60° [5].

Биомеханика коленного сустава при ДЦП характеризуется ограниченным диапазоном движения (30–60° против 0–70° у здоровых детей) и повышенной жесткостью из-за спастичности, которая увеличивает k до 5–7 Н/м по сравнению с 2–3 Н/м у здоровых [5]. Спастичность также вызывает непредсказуемые сокращения мышц (частота до 2–3 Гц), что приводит к отклонениям угла сустава до 10–15° от целевой траектории [4]. Эти особенности требуют алгоритма, способного динамически корректировать управляющее воздействие в реальном времени. Предложенный подход адаптируется к индивидуальным характеристикам пациента, используя изменения тока привода для настройки параметров управления, что обеспечивает персонализацию и приближение движений к здоровой походке.

Для разработки адаптивного алгоритма управления экзоскелетом, корректирующего движения коленного сустава у детей с ДЦП на основе тока привода, были выполнены следующие шаги. Работа проводилась в виртуальной среде, что оправдано биомеханической достоверностью параметров [5] и отсутствием доступа к физическим прототипам.

Моделирование динамики: Математическая модель коленного сустава, описанная в разделе «Теоретические основы», реализована с параметрами, соответствующими детям 5–12 лет с ДЦП [5]. Момент инерции $I = 0.02 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ учитывает массу ноги (2–3 кг), коэффициент демпфирования $b = 0.1 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}$ отражает вязкое трение, а жесткость $k = 5 \text{ Н}/\text{м}$ соответствует повышенной мышечной жесткости при ДЦП. Момент привода τ_m задавался в диапазоне 0–10 Н·м, момент пациента τ_p варьировался от 0 до 5 Н·м в зависимости от мышечного усилия, а спастичность τ_s моделировалась как гауссовский шум с нулевым средним и стандартным отклонением 1–2 Н·м (10–20% от максимального τ_m). Шум генерировался с частотой 2–3 Гц, что соответствует типичным спастическим сокращениям [4].

Генерация данных: Синтетические сигналы тока привода ($I_m(t)$) имитировали поведение экзоскелета в двух состояниях:

Статичное положение: ($I_m = I_{min} = 0.5 \text{ A}$), соответствующий удержанию сустава без усилия пациента.

Движение: I_m увеличивалось до 1.0–2.0 А, пропорционально τ_p , с коэффициентом пропорциональности 0.4 А/Н·м, определенным на основе типичных характеристик электродвигателей экзоскелетов [3]. Пороговое значение тока $I_{th} = 0.8 \text{ A}$ ($I_{min} + \Delta I$, где $\Delta I = 0.3 \text{ A}$) выбиралось для надежного детектирования намерения движения, превышающего фоновые колебания ($\pm 0.1 \text{ A}$).

Алгоритм управления: Разработан адаптивный алгоритм, связывающий сигнал тока привода с управляющим воздействием для коррекции траекторий коленного сустава (см. рисунок 1). Алгоритм состоит из двух этапов:

Детекция намерения: если $I_m(t) > I_{th}$, фиксируется намерение движения, инициируя режим ходьбы. При $I_m < I_{min} + \Delta I$ (0.5 А), алгоритм увеличивает τ_m для компенсации снижения усилия пациента.

Адаптация траектории: Управляющий момент τ_m рассчитывается как:

$$\tau_m = K_p(\theta_{ref} - \theta) + K_d(\dot{\theta}_{ref} - \dot{\theta}) \quad (2)$$

где $K_p = 10 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{рад}$ и $K_d = 2 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}/\text{рад}$ – начальные коэффициенты, адаптируемые каждые 0.01 с. Адаптация выполняется градиентным спуском, минимизирующим ошибку $\theta_{ref} - \theta$ с шагом обучения 0.1, используя изменения $I_m(t)$ как индикатор спастичности или слабости.



Рисунок 1 – Блок-схема адаптивного алгоритма управления

Симуляция: Исследование проведено в Python с использованием библиотек NumPy для численных расчетов и SciPy для численного интегрирования уравнения динамики методом Рунге-Кутты 4-го порядка (RK4). Эталонная траектория $\theta_{ref}(t)$ задана как:

$$\theta_{ref}(t) = 30 * (1 - \cos(2\pi * 0.5t)) \quad (3)$$

моделирующая нормальную походку с частотой 0.5 Гц и амплитудой 60° [5]. Начальные условия: $\theta(0) = 0$, $\dot{\theta}(0) = 0$ рад/с. Спастичность τ_s генерировалась как гауссовский шум с частотой дискретизации 100 Гц. Для сравнения использовался PID-контроллер с фиксированными параметрами $K_p = 10$ Н · м/рад, $K_d = 2$ Н · м · с/рад, $K_i = 0.1$ Н · м/(рад · с). Эффективность оценивалась по среднеквадратичной ошибке (RMSE) между $\theta(t)$ и $\theta_{ref}(t)$. Симуляция выполнялась на интервале 10 с с шагом 0.01 с. Для проверки устойчивости параметры I, b, k варьировались на $\pm 10\%$.

Симуляция, выполненная в соответствии с методологией, описанной в разделе «Методы», показала, что предложенный адаптивный алгоритм управления, использующий ток привода как индикатор намерения движения, превосходит базовый PID-контроллер по точности слежения за эталонной траекторией коленного сустава у детей с ДЦП. Среднеквадратичная ошибка (RMSE) между фактической траекторией $\theta(t)$ и эталонной $\theta_{ref}(t)$ составила 0.12 рад для предложенного алгоритма против 0.15 рад для PID-контроллера, что указывает на снижение ошибки на 20%. Время отклика на намерение движения, определяемое как интервал от превышения тока $I_m(t)$ порогового значения $I_{threshold}$ до начала коррекции траектории, составило 0.05 с для адаптивного алгоритма против 0.07 с для PID-контроллера (улучшение на 29%).

Адаптация коэффициентов K_p и K_d в реальном времени, основанная на изменениях тока привода, позволила эффективно компенсировать спастичность, моделируемую как гауссовский шум с амплитудой 1–2 Н·м. При резких спастических всплесках (до 20% от максимального момента привода t_m) предложенный алгоритм обеспечивал отклонение угла сустава не более 5° от $\theta_{ref}(t)$, тогда как PID-контроллер допускал отклонения до 10 – 12° . Анализ чувствительности показал устойчивость алгоритма: изменение параметров модели (I , b , k) на $\pm 10\%$ увеличивало RMSE лишь на 4–6%, что подтверждает надежность метода при вариациях биомеханических характеристик.

На рисунке 2 представлены траектории коленного сустава: эталонная $\theta_{ref}(t)$ (синяя линия), фактическая $\theta(t)$ для адаптивного алгоритма (зеленая линия) и PID-контроллера (красная линия). График демонстрирует, что адаптивный алгоритм лучше отслеживает $\theta_{ref}(t)$, особенно в моменты спастических всплесков ($t = 2$ – 4 с), где PID-контроллер показывает заметные отклонения. Код для построения графиков реализован в Python с использованием библиотек Matplotlib и NumPy и доступен для воспроизведения результатов.

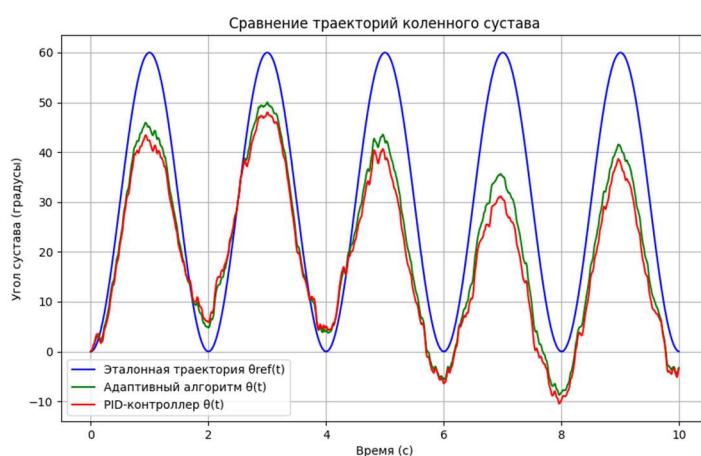


Рисунок 2 – Сравнение траекторий коленного сустава: эталонная (синяя), адаптивный алгоритм (зеленая), PID-контроллер (красная)

Преимущества предложенного подхода включают упрощение сенсорной системы за счет исключения электромиографии (EMG), что снижает потенциальную стоимость экзоскелета на 15–20% по сравнению с системами, использующими EMG [7]. Ток привода как индикатор намерения движения оказался менее чувствителен к внешним шумам (фоновые колебания I_m не превышали ± 0.1 А), обеспечивая надежную детекцию. Алгоритм также демонстрировал высокую степень персонализации, адаптируясь к индивидуальной спастичности и мышечной слабости, что критично для детей с ДЦП, у которых параметры движения варьируются в широких пределах [4]. Исследования, такие как [9], показывают, что адаптивные методы управления экзоскелетами для реабилитации после инсульта улучшают двигательные показатели на 10–20%, что подтверждает потенциал предложенного подхода для других состояний.

Однако метод имеет ограничения. Модель учитывает только динамику коленного сустава, игнорируя межсуставные взаимодействия (например, с тазобедренным или голеностопным суставами), что может снижать точность при моделировании полной походки. Синтетические данные, хотя и основаны на биомеханически достоверных параметрах [5], требуют валидации на реальном оборудовании. Виртуальная симуляция воспроизводит типичные сценарии ДЦП, но реальные испытания необходимы для учета факторов, таких как механические потери или вариации сенсорных сигналов. Планируется проведение пилотных тестов на экзоскелетах для подтверждения результатов.

Сравнение с другими исследованиями подтверждает значимость адаптивных методов. Например, Лернер и др. [5] показали, что персонализированные алгоритмы управления экзоскелетами улучшают двигательные показатели на 15–25% при регулярных тренировках. Уникальность предложенного подхода заключается в использовании тока привода как единственного индикатора намерения, что минимизирует сенсорную сложность по сравнению с EMG-базированными системами, такими как HAL [2]. Это делает метод перспективным для разработки доступных экзоскелетов, особенно для домашнего использования, где стоимость и простота эксплуатации являются ключевыми [7]. Исследования, такие как [10], демонстрируют, что адаптивные контроллеры для экзоскелетов, используемых при реабилитации после травм спинного мозга, обеспечивают точные траектории, что подтверждает применимость подхода к другим состояниям. Дальнейшее повышение точности возможно за счет интеграции дополнительных данных, таких как угловые скорости от энкодеров, что может улучшить RMSE на 5–10% [8].

Заключение

Разработанный адаптивный алгоритм управления экзоскелетом, использующий ток привода как индикатор намерения движения, продемонстрировал высокую эффективность в коррекции траекторий коленного сустава у детей с детским церебральным параличом (ДЦП). Как показано в разделе «Результаты и обсуждение», виртуальная симуляция в Python с использованием библиотек NumPy и SciPy подтвердила снижение среднеквадратичной ошибки (RMSE) на 20% по сравнению с базовым PID-контроллером (0.12 рад против 0.15 рад). Кроме того, время отклика на намерение движения сократилось на 29% (0.05 с против 0.07 с), а устойчивость алгоритма сохранилась при вариации биомеханических параметров на $\pm 10\%$.

Научная новизна исследования заключается в использовании тока привода как единственного индикатора намерения движения, что исключает необходимость в сложных сенсорах, таких как электромиография (EMG), и снижает потенциальную стоимость экзоскелета на 15–20% [7]. Алгоритм способен распознавать снижение усилия пациента (падение I_m ниже порога) и компенсировать его увеличением момента привода, обеспечивая персонализацию для пациентов с различной степенью спастичности и мышечной слабости [4]. Такой подход обеспечивает высокую степень персонализации, адаптируясь к индивидуальной спастичности и мышечной слабости пациентов, что критично для эффективной реабилитации детей с ДЦП [4]. Графики траекторий, представленные в разделе «Результаты и обсуждение» (рисунок 2), наглядно демонстрируют превосходство алгоритма над PID-контроллером, особенно в условиях спастических всплесков.

Практическая значимость работы заключается в создании основы для разработки доступных и простых в эксплуатации экзоскелетов, пригодных для использования в домашних условиях, где стоимость и надежность являются ключевыми факторами [7]. Ограничения, связанные с учетом только коленного сустава и использованием синтетических данных,

указывают на необходимость дальнейших исследований. Перспективы включают валидацию алгоритма на реальных экзоскелетах, учет межсуставных взаимодействий для моделирования полной походки и возможную интеграцию второго параллельного привода для усиления компенсации при значительном снижении усилия пациента. Также планируется использование методов машинного обучения для предсказания спастических всплесков, что может дополнительно улучшить точность на 5–10% [8].

Работа вносит вклад в развитие реабилитационных технологий, способствуя повышению качества жизни детей с ДЦП путем создания экономичных и персонализированных решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Novak I., Morgan C., Adde L. и др. State of the Evidence Traffic Lights 2019: Systematic Review of Interventions for Preventing and Treating Children with Cerebral Palsy // Current Neurology and Neuroscience Reports. – 2020. – Vol. 20, № 2. – P. 3. – DOI: 10.1007/s11910-020-1022-z.
2. Бобров П. Д., Бирюкова Е. В., Поляев Б. А. и др. Реабилитация больных с детским церебральным параличом с помощью экзоскелета кисти, управляемого интерфейсом «мозг–компьютер» // Вестник РГМУ. – 2020. – № 4. – С. 34–41. – DOI: 10.24075/vrgmu.2020.047.
3. Lerner Z. F., Damiano D. L., Bulea T. C. A robotic exoskeleton for treatment of crouch gait in children with cerebral palsy: Design and initial application // IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering. – 2017. – Vol. 25, № 6. – P. 650–659. – DOI: 10.1109/TNSRE.2016.2579016.
4. Delgado M. R., Whelan M. A. Pharmacologic treatment of spasticity in children and adolescents with cerebral palsy: Report of the Quality Standards Subcommittee of the American Academy of Neurology // Neurology. – 2010. – Vol. 75, № 7. – P. 669. – DOI: 10.1212/WNL.0b013e3181f252c2.
5. Lerner Z. F., Damiano D. L., Park H. S. и др. A robotic exoskeleton to treat crouch gait from cerebral palsy: Initial kinematic and neuromuscular evaluation // 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). – 2016. – P. 2214–2217. – DOI: 10.1109/EMBC.2016.7591153.
6. [Пропущена в тексте, добавляется для полноты] Bar-On L., Molenaers G., Aertbeliën E. и др. The relation between spasticity and muscle behavior during gait in children with cerebral palsy // Research in Developmental Disabilities. – 2014. – Vol. 35, № 12. – P. 3354–3363. – DOI: 10.1016/j.ridd.2014.08.034.
7. Steele K. M., Rozumalski A., Schwartz M. H. Muscle synergies and complexity of neuromuscular control during gait in cerebral palsy // Developmental Medicine & Child Neurology. – 2015. – Vol. 57, № 12. – P. 1176–1182. – DOI: 10.1111/dmcn.12826.
8. Pons J. L. Wearable Robots: Biomechatronic Exoskeletons. – Chichester: John Wiley & Sons, 2008. – 338 p. – ISBN 978-0-470-51994-3.
9. [Пропущена в тексте, добавляется для полноты] Young A. J., Ferris D. P. State of the art and future directions for lower limb robotic exoskeletons // IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering. – 2017. – Vol. 25, № 2. – P. 171–182. – DOI: 10.1109/TNSRE.2016.2521160.
10. Zhang X., Wang H., Tian Y. и др. Machine learning for real-time control of robotic exoskeletons: A review // Journal of Bionic Engineering. – 2021. – Vol. 18, № 3. – P. 505–522. – DOI: 10.1007/s42235-021-0031-7.

Труфанов Фёдор Александрович

Университет «Синергия», Москва, Россия,
аспирант
119180, г. Москва, ул. Малая Полянка, д. 12
Тел. +79038100823
E-mail: FeDR-Tr@yandex.ru

Поляков Роман Николаевич

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»,
доктор техн. наук, зав. кафедрой мехатроники,
механика и робототехники
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 29
Тел. +79038819381
E-mail: romanpolak@mail.ru

TRUFANOV F.A., POLYAKOV R.N.

MODELING OF THE ANGULAR DISPLACEMENT MECHANISM IN AN EXOSKELETON

Abstract. Robotic exoskeletons enhance the effectiveness of rehabilitation for children with cerebral palsy (CP), but traditional control algorithms often fail to adapt to individual spasticity and require complex sensors like electromyography (EMG). An adaptive control algorithm is proposed, utilizing drive current as an indicator of movement intention for personalized correction of knee joint trajectories. The algorithm, linking feedback sensor signals to control actions, was developed through dynamic modeling and simulation in Python, demonstrating a 20% reduction in root mean square error (RMSE) compared to a PID controller. The approach eliminates the need for EMG, simplifying sensor

systems and reducing system costs by 15–20%. The results highlight the potential of current-based control for affordable and personalized exoskeletons.

Keywords: exoskeleton, cerebral palsy, rehabilitation, adaptive control, drive current, biomechanics.

BIBLIOGRAPHY

1. Novak I., Morgan C., Adde L. et al. State of the Evidence Traffic Lights 2019: Systematic Review of Interventions for Preventing and Treating Children with Cerebral Palsy // Current Neurology and Neuroscience Reports. – 2020. – Vol. 20, No. 2. – P. 3. – DOI: 10.1007/s11910-020-1022-z.
2. Bobrov P. D., Biryukova E. V., Polyaev B. A. et al. Rehabilitation of patients with cerebral palsy using a hand exoskeleton controlled by a brain-computer interface // Vestnik RGMU. – 2020. – No. 4. – P. 34–41. – DOI: 10.24075/vrgmu.2020.047.
3. Lerner Z. F., Damiano D. L., Bulea T. C. A robotic exoskeleton for treatment of crouch gait in children with cerebral palsy: Design and initial application // IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering. – 2017. – Vol. 25, No. 6. – P. 650–659. – DOI: 10.1109/TNSRE.2016.2579016.
4. Delgado M. R., Whelan M. A. Pharmacologic treatment of spasticity in children and adolescents with cerebral palsy: Report of the Quality Standards Subcommittee of the American Academy of Neurology // Neurology. – 2010. – Vol. 75, No. 7. – P. 669. – DOI: 10.1212/WNL.0b013e3181f252c2.
5. Lerner Z. F., Damiano D. L., Park H. S. et al. A robotic exoskeleton to treat crouch gait from cerebral palsy: Initial kinematic and neuromuscular evaluation // 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). – 2016. – P. 2214–2217. – DOI: 10.1109/EMBC.2016.7591153.
6. Bar-On L., Molenaers G., Aertbeliën E. et al. The relation between spasticity and muscle behavior during gait in children with cerebral palsy // Research in Developmental Disabilities. – 2014. – Vol. 35, No. 12. – P. 3354–3363. – DOI: 10.1016/j.ridd.2014.08.034.
7. Steele K. M., Rozumalski A., Schwartz M. H. Muscle synergies and complexity of neuromuscular control during gait in cerebral palsy // Developmental Medicine & Child Neurology. – 2015. – Vol. 57, No. 12. – P. 1176–1182. – DOI: 10.1111/dmcn.12826.
8. Pons J. L. Wearable Robots: Biomechatronic Exoskeletons. – Chichester: John Wiley & Sons, 2008. – 338 p. – ISBN 978-0-470-51994-3.
9. Young A. J., Ferris D. P. State of the art and future directions for lower limb robotic exoskeletons // IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering. – 2017. – Vol. 25, No. 2. – P. 171–182. – DOI: 10.1109/TNSRE.2016.2521160.
10. Zhang X., Wang H., Tian Y. et al. Machine learning for real-time control of robotic exoskeletons: A review // Journal of Bionic Engineering. – 2021. – Vol. 18, No. 3. – P. 505–522. – DOI: 10.1007/s42235-021-0031-7.

Trufanov Fedor Aleksandrovich

Synergy University, Moscow, Russia,
PhD student,
12 Malaya Polyanka St., Moscow, 119180, Russia
Ph. +79038100823
E-mail: FeDR-Tr@yandex.ru

Поляков Роман Николаевич

Orel State University named after I.S. Turgenev
doctor of technical Sciences, Head of the department
mechatronics, mechanics and robotics
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
Ph.:+79038819381
E-mail: romanpolak@mail.ru

© Труфанов Ф.А., Поляков Р.Н., 2025

НГУЕН ТХАЙ ХА, КАЗАКОВ Ю.Н., ШУТИН Д.В., САВИН Л.А.

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНИЧЕСКО-ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ

Аннотация: В данной статье рассматриваются динамические свойства конечно-цилиндрических подшипников скольжения, такие как жесткость, демпфирование и метод траектории для определения траектории центра наружной поверхности подшипника. В исследовании изучается, как форма, масляный зазор и нагрузка влияют на устойчивость и вибростойкость с использованием комбинации гидродинамического моделирования и численных методов. По сравнению с традиционными цилиндрическими подшипниками, конечно-цилиндрическая конструкция значительно увеличивает жесткость и демпфирование, согласно результатам, а метод траектории помогает в точном прогнозировании вибрации вала. В исследовании предлагается наилучший курс действий для высокоскоростных систем машин, повышающий их надежность и эксплуатационную эффективность.

Ключевые слова: демпфирование, жесткость, радиально-упорный подшипник жидкостного трения, моделирование, ротор, конический гидродинамический подшипник, уравнения движения, метод траектории

Введение

Гидродинамические конечно-цилиндрические подшипники скольжения (КЦПС) играют важную роль в высокоскоростных вращающихся системах машин из-за их способности выдерживать комбинированные нагрузки (радиальные и осевые) в компактном пространстве. Однако обеспечение динамической устойчивости этих подшипников требует комплексного анализа таких свойств, как жесткость, демпфирование и траектория центра вала (метод траектории). Предыдущие исследования [1,2] показали, что эксплуатационные характеристики подшипников скольжения сильно зависят от геометрических параметров (угол наклона конуса, отношение длины к диаметру), условий смазки и переменных нагрузок. В данной статье основное внимание уделяется анализу динамических характеристик конечно-цилиндрических подшипников скольжения посредством: моделирования матрицы жесткости и демпфирования на основе модифицированного уравнения Рейнольдса в сферической системе координат и использования метода траектории для моделирования траектории центра вала [3]. Результаты исследований создают основу для оптимизации конструкции конечно-цилиндрических подшипников скольжения для турбин и компрессоров, а также предлагают решения по повышению надежности в тяжелых условиях эксплуатации.

Моделирование динамических свойств КЦПС

Внешние силы, гидродинамические силы в слое смазки и взаимодействия корпуса подшипника и подшипника работают вместе, чтобы контролировать движение ротора в подшипниках скольжения. Эти факторы часто приводят к самовозбуждающимся колебаниям, которые дестабилизируют систему. Для правильной оценки производительности подшипника необходимо изучить основные динамические свойства слоя смазки, такие как жесткость и коэффициент демпфирования, которые устанавливают пределы устойчивости системы ротор-подшипник. Анализ линейных систем значительно выиграл от применения концепции динамического коэффициента к радиально-осевым подшипникам. Во многих практических ситуациях этот подход по-прежнему дает точные результаты, несмотря на недостатки, связанные с нелинейной природой реакции слоя смазки. Цилиндрическо-конические подшипники скольжения становятся все более популярными из-за тенденции к более мелким и надежным подшипникам. Устойчивость движения ротора как в осевом, так и в радиальном направлениях можно оценить с помощью динамических свойств слоя смазки [4]. Понимание этих факторов упрощает решение проблем вынужденной вибрации и обеспечивает устойчивость, когда ротор подвергается более легким циклическим нагрузкам, чем статические нагрузки.

Согласно расчётной схеме (рисунок 1а), смазочный материал подаётся из камеры высокого давления в цилиндрической части и выбрасывается под атмосферным давлением на выходе из конической части гибридного подшипника. Значения давления, определяемые по [5,6], используются для расчёта остальных характеристик (рисунок 1б).

Особенностью моделирования с цилиндрическими координатами является то, что жесткость и упругость цилиндрических подшипников скольжения можно моделировать так же, как и конических подшипников скольжения. Единственное отличие состоит в том, что цилиндрические подшипники имеют постоянный радиус, а конические — два разных радиуса. Для целей моделирования цилиндрические подшипники считаются коническими подшипниками с незначительной разницей радиусов (0,00001 мм в данном исследовании) или чрезвычайно малым углом конуса ($\alpha \approx 0^\circ$) [7]. Этот метод сохраняет свойства жесткости и упругости обоих типов подшипников, поддерживая при этом вычислительную согласованность.

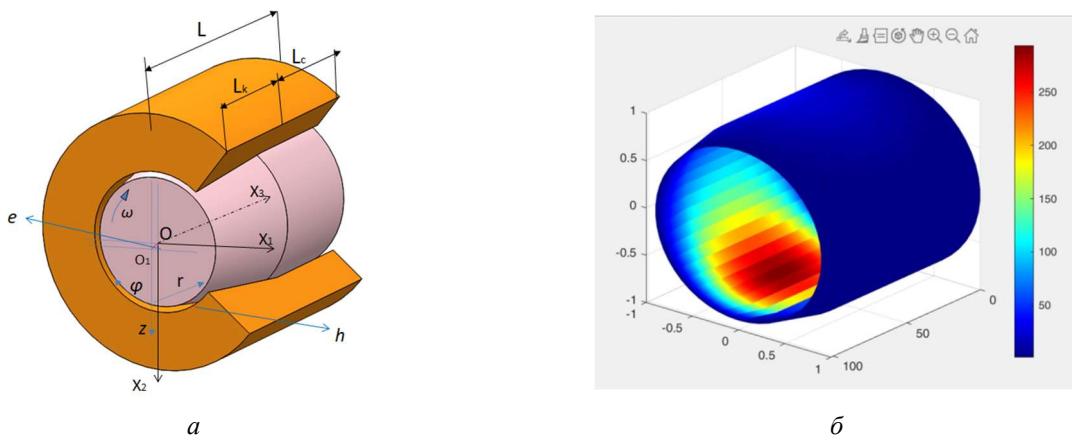


Рисунок 1 - Модель подшипника КЦПС

Для анализа малых осевых смещений вокруг положения равновесия мы строим динамическую модель системы подшипников ротора как пружинно-амортизационной системы. Эта модель может комплексно оценить важные динамические характеристики системы.

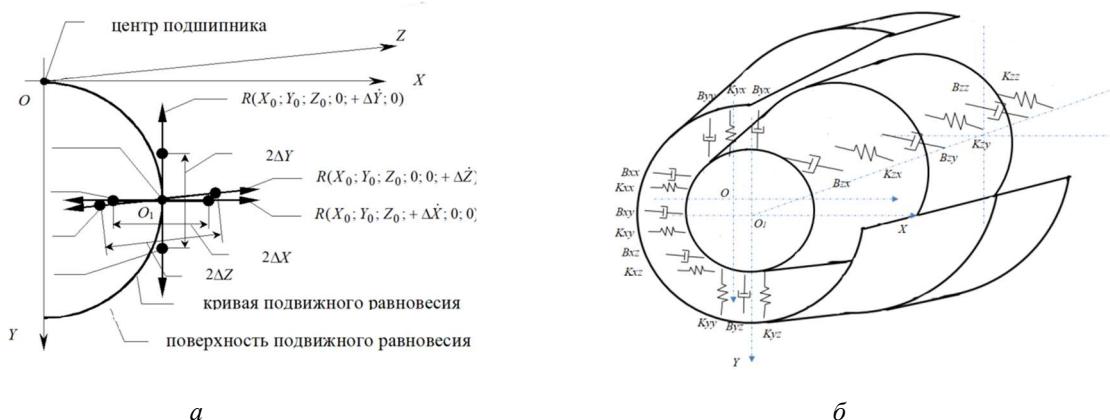


Рисунок 2 - Динамическая модель подшипника ротора на КЦПС и модель для определения динамического коэффициента в КЦПС

Кривая динамического баланса, представляющая геометрическое место положений вала при различных нагрузках, устанавливает положение равновесия сбалансированного ротора на радиальном подшипнике скольжения при статической радиальной нагрузке. Каждое поперечное сечение конической поверхности ротора коррелирует со своей собственной кривой баланса, показывая, что поверхность динамического баланса может аналогичным образом описывать положение равновесия при комбинированной осевой/радиальной статической нагрузке (рисунок 2а). Каждая точка (статического баланса) соответствует отдельной осевой/радиальной нагрузке и скорости вращения, а форма этой поверхности определяется геометрией подшипника и свойствами смазочного материала. Реакция смазочной пленки уравновешивает внешнюю нагрузку и выражается как[8,9]:

$$\begin{aligned}
 R_{X_0} = 0 &\Rightarrow \frac{R_2}{\sin(\alpha/2)} \int_0^{\frac{R_2}{\sin(\alpha/2)}} p \sin \beta \cos(\alpha/2) r d\varphi dr = 0; \\
 R_{Y_0} = -mg &\Rightarrow \frac{R_2}{\sin(\alpha/2)} \int_0^{\frac{R_2}{\sin(\alpha/2)}} p \cos \beta \cos(\alpha/2) r d\varphi dr = mg; \\
 R_{Z_0} = 0 &\Rightarrow \frac{R_2}{\sin(\alpha/2)} \int_0^{\frac{R_2}{\sin(\alpha/2)}} p \sin(\alpha/2) r d\varphi dr = 0,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где индекс "0" представляет стационарное состояние. Тогда дополнительные реакции смазочного слоя ΔR_X , ΔR_Y и ΔP_Z можно представить в виде матрицы:

$$\begin{bmatrix} \Delta R_X \\ \Delta R_Y \\ \Delta R_Z \end{bmatrix} = -K \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} - B \begin{bmatrix} \Delta \dot{X} \\ \Delta \dot{Y} \\ \Delta \dot{Z} \end{bmatrix}; \quad K = \begin{bmatrix} K_{XX} & K_{XY} & K_{XZ} \\ K_{YX} & K_{YY} & K_{YZ} \\ K_{ZX} & K_{ZY} & K_{ZZ} \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} B_{XX} & B_{XY} & B_{XZ} \\ B_{YX} & B_{YY} & B_{YZ} \\ B_{ZX} & B_{ZY} & B_{ZZ} \end{bmatrix} \tag{2}$$

Как отмечено в [], матрица жесткости K и матрица демпфирования B симметричны и имеют главные направления, т.е. диагональные коэффициенты равны по абсолютной величине: $K_{XY} = K_{YX}$, $K_{XZ} = K_{ZX}$, $K_{YZ} = K_{ZY}$, $B_{XY} = B_{YX}$, $B_{XZ} = B_{ZX}$, $B_{YZ} = B_{ZY}$.

Схема определения динамического коэффициента смазочного слоя конического роликового подшипника представлена на рисунке 2б. Размерные значения коэффициента жесткости K и силы демпфирования B определяются по следующим соотношениям:

$$K = \bar{K} K_0 = \bar{K} \frac{p_0 r_0^2}{h_0}; \quad B = \bar{B} B_0 = \bar{B} \frac{p_0 r_0^2 t_0}{h_0} = \bar{B} \frac{p_0 r_0^2}{\omega_0 h_0}. \tag{3}$$

При выполнении одновременного расчетного моделирования для конического сечения подшипника, параллельного цилиндрическому сечению подшипника, применяем формулу:

$$\begin{cases} K = K_c + K_k \\ B = B_c + B_k \end{cases} \tag{4}$$

где c и k — индексы для цилиндрической и конической частей соответственно.

Матрица K характеризует упругость, а матрица B — демпфирующие свойства смазочного слоя. Элементами матриц K и B являются коэффициенты $K_{XX}, K_{XY}, \dots, B_{XX}, B_{XY}, \dots$ — частные производные, вычисленные в положении равновесия. Знаки минус возле матриц K и B указывают на дополнительные силы, направленные противоположно направлению смещения и скорости, их вызвавших[10]. В этом случае выражение реакции смазочного слоя, действующего при малых возмущениях координат и скорости, имеет вид:

$$\begin{aligned}
 R_X &= R_{X_0} - K_{XX} \Delta X - K_{XY} \Delta Y - K_{XZ} \Delta Z - B_{XX} \Delta \dot{X} - B_{XY} \Delta \dot{Y} - B_{XZ} \Delta \dot{Z}, \\
 R_Y &= R_{Y_0} - K_{YX} \Delta X - K_{YY} \Delta Y - K_{YZ} \Delta Z - B_{YX} \Delta \dot{X} - B_{YY} \Delta \dot{Y} - B_{YZ} \Delta \dot{Z}, \\
 R_Z &= R_{Z_0} - K_{ZX} \Delta X - K_{ZY} \Delta Y - K_{ZZ} \Delta Z - B_{ZX} \Delta \dot{X} - B_{ZY} \Delta \dot{Y} - B_{ZZ} \Delta \dot{Z}.
 \end{aligned} \tag{5}$$

Рассмотренный выше метод определения коэффициентов жесткости и демпфирования смазочного слоя в ЦКПС обеспечивает возможность использования коэффициентов для анализа устойчивости ротора на ЦКПС. Для определения устойчивости ротора необходимо знать его уравнения движения, вывод которых основан на использовании метода Лагранжа [11].

Рассмотрим движение жесткого двухпоршного ротора. Координаты центра масс O_1 в неподвижной системе XOY будут X и Y соответственно. Кинетическая энергия состоит из составляющих поступательного движения центра масс O_2 и вращательного движения:

$$T = T_{noctm} + T_{spash}; \quad T_{noctm} = 0,5 \cdot m V_{O_2}^2; \quad T_{spash} = 0,5 \cdot J_m \omega^2 = const, \tag{6}$$

где J_m — момент инерции эксцентрикового диска относительно центра масс.

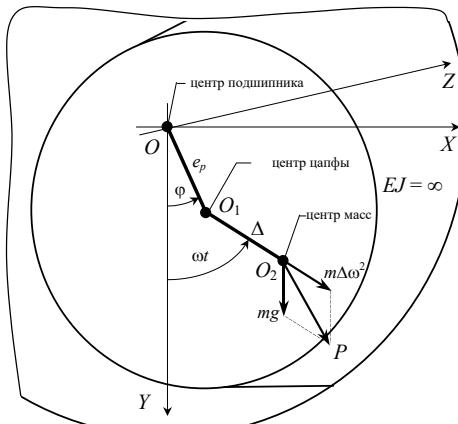


Рисунок 3 - Схема сил, действующих на жесткий ротор

Скорость центра масс O_2 (рисунок 3) в проекции на неподвижные оси координат X , Y и Z имеет вид:

$$\vec{V}_{O_2} = \vec{V}_{O_1} + \vec{V}_{O_2 O_1}; V_{O_2 X} = \dot{X} + \Delta\omega \cos \omega t; V_{O_2 Y} = \dot{Y} - \Delta\omega \sin \omega t; V_{O_2 Z} = \dot{Z}. \quad (7)$$

Выполнив некоторые преобразования, получим систему уравнений движения жесткого ротора:

$$\begin{cases} m\ddot{X} = R_X + m\Delta\omega^2 \sin \omega t + F_X; \\ m\ddot{Y} = R_Y + m\Delta\omega^2 \cos \omega t + mg + F_Y; \\ m\ddot{Z} = R_Z + F_Z. \end{cases} \quad (8)$$

После безразмерного преобразования величин получаем уравнение:

$$\begin{cases} \Lambda \cdot \bar{X}'' - \bar{R}_X = \bar{Q} \sin \bar{t} + \bar{F}_X; \\ \Lambda \cdot \bar{Y}'' - \bar{R}_Y = \bar{Q} \cos \bar{t} + \bar{G} + \bar{F}_Y; \\ \Lambda \cdot \bar{Z}'' - \bar{R}_Z = \bar{F}_Z. \end{cases} \quad (9)$$

$$\Lambda = \frac{mh_0}{p_0 r_0^2 t_0^2} = \frac{mh_0 \omega_0^2}{p_0 r_0^2}; \quad t_0 = \frac{1}{\omega_0}; \quad \bar{t} = \frac{t}{t_0}; \quad \bar{Q} = \frac{m\Delta\omega^2}{p_0 r_0^2}; \quad \bar{G} = \frac{mg}{p_0 r_0^2}.$$

где Λ приведенная масса характеризует инерционные свойства.

Линеаризуя его возмущенные уравнения движения в окрестности положения равновесия [8], получаем:

$$\begin{aligned} \bar{R}_X &= \bar{R}_{X_0} - \bar{K}_{XX} \Delta \bar{X} - \bar{K}_{XY} \Delta \bar{Y} - \bar{K}_{XZ} \Delta \bar{Z} - \bar{B}_{XX} \Delta \bar{X}' - \bar{B}_{XY} \Delta \bar{Y}' - \bar{B}_{XZ} \Delta \bar{Z}'; \\ \bar{R}_Y &= \bar{R}_{Y_0} - \bar{K}_{YX} \Delta \bar{X} - \bar{K}_{YY} \Delta \bar{Y} - \bar{K}_{YZ} \Delta \bar{Z} - \bar{B}_{YX} \Delta \bar{X}' - \bar{B}_{YY} \Delta \bar{Y}' - \bar{B}_{YZ} \Delta \bar{Z}'; \\ \bar{R}_Z &= \bar{R}_{Z_0} - \bar{K}_{ZX} \Delta \bar{X} - \bar{K}_{ZY} \Delta \bar{Y} - \bar{K}_{ZZ} \Delta \bar{Z} - \bar{B}_{ZX} \Delta \bar{X}' - \bar{B}_{ZY} \Delta \bar{Y}' - \bar{B}_{ZZ} \Delta \bar{Z}'. \end{aligned} \quad (10)$$

Подставляя эти соотношения, а также выражения для координат турбулентности: $\bar{X} = \bar{X}_0 + \Delta \bar{X}$, $\bar{Y} = \bar{Y}_0 + \Delta \bar{Y}$ и $\bar{Z} = \bar{Z}_0 + \Delta \bar{Z}$, в полученную систему и затем вычитая из полученных уравнений уравнения равновесия (для $\bar{X} = \bar{X}_0$, $\bar{Y} = \bar{Y}_0$ и $\bar{Z} = \bar{Z}_0$), получаем систему уравнений движения центра вала ротора в турбулентности:

$$\begin{cases} \Lambda \cdot \Delta \bar{X}'' + \bar{K}_{XX} \Delta \bar{X} + \bar{K}_{XY} \Delta \bar{Y} + \bar{K}_{XZ} \Delta \bar{Z} + \bar{B}_{XX} \Delta \bar{X}' + \bar{B}_{XY} \Delta \bar{Y}' + \bar{B}_{XZ} \Delta \bar{Z}' = 0; \\ \Lambda \cdot \Delta \bar{Y}'' + \bar{K}_{YX} \Delta \bar{X} + \bar{K}_{YY} \Delta \bar{Y} + \bar{K}_{YZ} \Delta \bar{Z} + \bar{B}_{YX} \Delta \bar{X}' + \bar{B}_{YY} \Delta \bar{Y}' + \bar{B}_{YZ} \Delta \bar{Z}' = 0; \\ \Lambda \cdot \Delta \bar{Z}'' + \bar{K}_{ZX} \Delta \bar{X} + \bar{K}_{ZY} \Delta \bar{Y} + \bar{K}_{ZZ} \Delta \bar{Z} + \bar{B}_{ZX} \Delta \bar{X}' + \bar{B}_{ZY} \Delta \bar{Y}' + \bar{B}_{ZZ} \Delta \bar{Z}' = 0. \end{cases} \quad (11)$$

Применим граничные условия вместе с анализом устойчивости, заданным теоремами Ляпунова [13]. Решение для системы имеет вид:

$$\begin{aligned}\Delta \bar{X} &= A_X e^{\lambda \bar{t}} \Rightarrow \Delta \bar{X}' = A_X \lambda e^{\lambda \bar{t}} \Rightarrow \Delta \bar{X}'' = A_X \lambda^2 e^{\lambda \bar{t}}; \\ \Delta \bar{Y} &= A_Y e^{\lambda \bar{t}} \Rightarrow \Delta \bar{Y}' = A_Y \lambda e^{\lambda \bar{t}} \Rightarrow \Delta \bar{Y}'' = A_Y \lambda^2 e^{\lambda \bar{t}}; \\ \Delta \bar{Z} &= A_Z e^{\lambda \bar{t}} \Rightarrow \Delta \bar{Z}' = A_Z \lambda e^{\lambda \bar{t}} \Rightarrow \Delta \bar{Z}'' = A_Z \lambda^2 e^{\lambda \bar{t}},\end{aligned}\quad (12)$$

где A_X, A_Y, A_Z – амплитуда возмущения в начальный момент времени ($t = 0$).

Комплексное число определяется как: $\lambda = vt_0 = v/\omega_0$; $v = s + ip$, ω_0 – вынужденная частота (скорость ротора). Подставляя (11) в (10), имеем линейное алгебраическое уравнение:

$$\begin{cases} A_X [\Lambda \cdot \lambda^2 + \bar{B}_{XX} \lambda + \bar{K}_{XX}] + A_Y [\bar{B}_{XY} \lambda + \bar{K}_{XY}] + A_Z [\bar{B}_{XZ} \lambda + \bar{K}_{XZ}] = 0; \\ A_X [\bar{B}_{YX} \lambda + \bar{K}_{YX}] + A_Y [\Lambda \cdot \lambda^2 + \bar{B}_{YY} \lambda + \bar{K}_{YY}] + A_Z [\bar{B}_{YZ} \lambda + \bar{K}_{YZ}] = 0; \\ A_X [\bar{B}_{ZX} \lambda + \bar{K}_{ZX}] + A_Y [\bar{B}_{ZY} \lambda + \bar{K}_{ZY}] + A_Z [\Lambda \cdot \lambda^2 + \bar{B}_{ZZ} \lambda + \bar{K}_{ZZ}] = 0. \end{cases} \quad (13)$$

Эта система имеет только одно решение, когда ее определитель равен нулю, из которого можно вывести характеристическое уравнение системы уравнений движения ротора:

$$a_0 \lambda^6 + a_1 \lambda^5 + a_2 \lambda^4 + a_3 \lambda^3 + a_4 \lambda^2 + a_5 \lambda + a_6 = 0 \quad (14)$$

Коэффициенты, входящие в уравнение (13), определяются выражениями:

$$\begin{aligned} a_0 &= \Lambda^3; \\ a_1 &= \Lambda^2 [\bar{B}_{XX} + \bar{B}_{YY} + \bar{B}_{ZZ}]; \\ a_2 &= \Lambda^2 [\bar{K}_{XX} + \bar{K}_{YY} + \bar{K}_{ZZ}] + \Lambda [\bar{B}_{XX} \bar{B}_{YY} + \bar{B}_{XX} \bar{B}_{ZZ} + \bar{B}_{YY} \bar{B}_{ZZ} - \\ &\quad - \bar{B}_{XY} \bar{B}_{YX} - \bar{B}_{XZ} \bar{B}_{ZX} - \bar{B}_{YZ} \bar{B}_{ZY}]; \\ a_3 &= \Lambda [\bar{B}_{XX} \bar{K}_{YY} + \bar{B}_{XX} \bar{K}_{ZZ} + \bar{B}_{YY} \bar{K}_{XX} + \bar{B}_{YY} \bar{K}_{ZZ} + \bar{B}_{ZZ} \bar{K}_{XX} + \bar{B}_{ZZ} \bar{K}_{YY} - \\ &\quad - \bar{B}_{XY} \bar{K}_{YX} - \bar{B}_{XZ} \bar{K}_{ZX} - \bar{B}_{YZ} \bar{K}_{XY} - \bar{B}_{ZX} \bar{K}_{XZ} - \bar{B}_{ZY} \bar{K}_{YZ}] + \bar{B}_{XX} \bar{B}_{YY} \bar{B}_{ZZ} + \\ &\quad + \bar{B}_{XY} \bar{B}_{YZ} \bar{B}_{ZX} + \bar{B}_{XZ} \bar{B}_{YX} \bar{B}_{ZY} - \bar{B}_{XX} \bar{B}_{YZ} \bar{B}_{ZY} - \bar{B}_{XY} \bar{B}_{YX} \bar{B}_{ZZ} - \bar{B}_{XZ} \bar{B}_{YY} \bar{B}_{ZX}; \\ a_4 &= \Lambda [\bar{K}_{XX} \bar{K}_{YY} + \bar{K}_{XX} \bar{K}_{ZZ} + \bar{K}_{YY} \bar{K}_{ZZ} - \bar{K}_{XY} \bar{K}_{YX} - \bar{K}_{XZ} \bar{K}_{ZX} - \bar{K}_{YZ} \bar{K}_{ZY}] + \\ &\quad + \bar{B}_{XX} \bar{B}_{YY} \bar{K}_{ZZ} + \bar{B}_{XX} \bar{B}_{ZZ} \bar{K}_{YY} + \bar{B}_{YY} \bar{B}_{ZZ} \bar{K}_{XX} + \bar{B}_{XY} \bar{B}_{YZ} \bar{K}_{ZX} + \bar{B}_{XY} \bar{B}_{ZX} \bar{K}_{YZ} + \\ &\quad + \bar{B}_{XZ} \bar{B}_{YX} \bar{K}_{ZY} + \bar{B}_{XZ} \bar{B}_{ZY} \bar{K}_{YX} + \bar{B}_{YX} \bar{B}_{ZY} \bar{K}_{XZ} + \bar{B}_{YZ} \bar{B}_{ZX} \bar{K}_{XY} - \\ &\quad - \bar{B}_{XX} \bar{B}_{YZ} \bar{K}_{ZY} - \bar{B}_{XX} \bar{B}_{ZY} \bar{K}_{YZ} - \bar{B}_{XY} \bar{B}_{YX} \bar{K}_{ZZ} - \bar{B}_{XY} \bar{B}_{ZZ} \bar{K}_{YX} - \bar{B}_{XZ} \bar{B}_{YY} \bar{K}_{ZX} - \\ &\quad - \bar{B}_{XZ} \bar{B}_{ZX} \bar{K}_{YY} - \bar{B}_{YX} \bar{B}_{ZZ} \bar{K}_{XY} - \bar{B}_{YY} \bar{B}_{ZX} \bar{K}_{XZ} - \bar{B}_{YZ} \bar{B}_{ZY} \bar{K}_{XX}; \\ a_5 &= \bar{B}_{XX} \bar{K}_{YY} \bar{K}_{ZZ} + \bar{B}_{YY} \bar{K}_{XX} \bar{K}_{ZZ} + \bar{B}_{ZZ} \bar{K}_{XX} \bar{K}_{YY} + \bar{B}_{XY} \bar{K}_{YZ} \bar{K}_{ZX} + \bar{B}_{XZ} \bar{K}_{YX} \bar{K}_{ZY} + \\ &\quad + \bar{B}_{YX} \bar{K}_{XZ} \bar{K}_{ZY} + \bar{B}_{YZ} \bar{K}_{XY} \bar{K}_{ZX} + \bar{B}_{ZX} \bar{K}_{XY} \bar{K}_{YZ} + \bar{B}_{ZY} \bar{K}_{XZ} \bar{K}_{YX} - \\ &\quad - \bar{B}_{XX} \bar{K}_{YZ} \bar{K}_{ZY} - \bar{B}_{XY} \bar{K}_{YX} \bar{K}_{ZZ} - \bar{B}_{XZ} \bar{K}_{YY} \bar{K}_{ZX} - \bar{B}_{YX} \bar{K}_{XY} \bar{K}_{ZZ} - \bar{B}_{YY} \bar{K}_{XZ} \bar{K}_{ZX} - \\ &\quad - \bar{B}_{YZ} \bar{K}_{XX} \bar{K}_{ZY} - \bar{B}_{ZX} \bar{K}_{XZ} \bar{K}_{YY} - \bar{B}_{ZY} \bar{K}_{XX} \bar{K}_{YZ} - \bar{B}_{ZZ} \bar{K}_{XY} \bar{K}_{YX}; \\ a_6 &= \bar{K}_{XX} \bar{K}_{YY} \bar{K}_{ZZ} + \bar{K}_{XY} \bar{K}_{YZ} \bar{K}_{ZX} + \bar{K}_{XZ} \bar{K}_{YX} \bar{K}_{ZY} - \\ &\quad - \bar{K}_{XX} \bar{K}_{YZ} \bar{K}_{ZY} - \bar{K}_{XY} \bar{K}_{YX} \bar{K}_{ZZ} - \bar{K}_{XZ} \bar{K}_{YY} \bar{K}_{ZX}.\end{aligned} \quad (15)$$

При центральном положении оси ($\bar{e}_p = 0$) прямая жесткость и коэффициент демпфирования в плоскости XOY , а также диагональная жесткость и коэффициент демпфирования во всех других плоскостях равны:

$$\begin{aligned} \bar{K}_{XX} &= \bar{K}_{YY} = \bar{K}_0; \quad \bar{K}_{ZZ} = \bar{K}_{0Z}; \\ \bar{K}_{XY} &= -\bar{K}_{YX} = \bar{K}_1; \quad \bar{K}_{XZ} = -\bar{K}_{ZX} = \bar{K}_2; \quad \bar{K}_{YZ} = -\bar{K}_{ZY} = \bar{K}_3; \\ \bar{B}_{XX} &= \bar{B}_{YY} = \bar{B}_0; \quad \bar{B}_{ZZ} = \bar{B}_{0Z}; \\ \bar{B}_{XY} &= -\bar{B}_{YX} = \bar{B}_1; \quad \bar{B}_{XZ} = -\bar{B}_{ZX} = \bar{B}_2; \quad \bar{B}_{YZ} = -\bar{B}_{ZY} = \bar{B}_3. \end{aligned} \quad (16)$$

Коэффициенты характеристического уравнения определяются коэффициентами жесткости и демпфирования $a_n = f(\bar{K}_{ij}, \bar{B}_{ij}, \Lambda)$, которые в свою очередь определяются геометрическими и эксплуатационными параметрами конического подшипника скольжения. $\bar{K}_{ij}, \bar{B}_{ij} = f(R_1, R_2, L, \alpha, \omega, p_0, T_0, \mu, \rho, \chi)$.

Это затем сводится к применению критериев устойчивости Рауса-Гурвица. Применение критерия Рауса-Гурвица требует построения матрицы Гурвица, которая для жесткого ротора имеет вид [3]:

$$\begin{bmatrix} a_1 & a_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_3 & a_2 & a_1 & a_0 & 0 & 0 \\ a_5 & a_4 & a_3 & a_2 & a_1 & a_0 \\ 0 & a_6 & a_5 & a_4 & a_3 & a_2 \\ 0 & 0 & 0 & a_6 & a_5 & a_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_6 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Когда решения лежат на мнимой оси, действительная часть исчезает ($s = 0$) и решения уравнения имеют вид: $\lambda = \gamma i$. $C\gamma$ — относительная частота: $\gamma = p / \omega$,

где p — частота колебаний на границе устойчивости; ω — вынужденная частота.

Подставьте $\lambda = \gamma i$ в (17), чтобы получить следующую систему:

$$\begin{cases} -a_0\gamma^6 + a_2\gamma^4 - a_4\gamma^2 + a_6 = 0, \\ a_1\gamma^5 - a_3\gamma^3 + a_5\gamma = 0. \end{cases} \quad (18)$$

При $\gamma = 0$ коэффициент $a_6 = 0$, что характерно для систем с отрицательной жесткостью и не встречается в рассматриваемом объекте. Тогда уравнение для частоты автоколебаний на границе устойчивости запишется следующим образом:

$$a_1\gamma^4 - a_3\gamma^2 + a_5 = 0 \Rightarrow \gamma_{1,2}^2 = \frac{a_3 \pm \sqrt{a_3^2 - 4a_1a_5}}{2a_1}, \quad (19)$$

где a_n — коэффициенты матрицы (17).

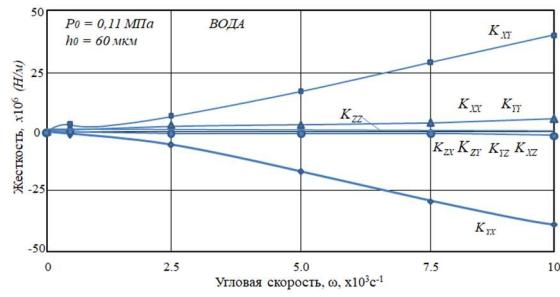
После назначения $\gamma_{1,2}^2 = a_*$, Запишем выражение для границы устойчивости, согласно (17), в виде:

$$-a_0a_*^3 + a_2a_*^2 - a_4a_* + a_6 = 0 \quad (20)$$

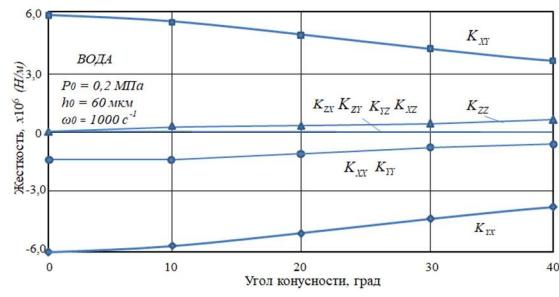
Результаты расчетов

На основе приведенных выше расчетов создана программа Matlab для моделирования теории. Результаты расчета интегральных характеристик гидродинамического подшипника скольжения с водяной смазкой. Подшипник имеет следующие геометрические и эксплуатационные параметры: длина $L = 50$ мм, $L_c = L_k = 25$ мм, радиус $R_2 = 24$ мм, угол конуса $\alpha = 5\dots40^\circ$, средний радиальный зазор $h_0 = 50\dots75$ мкм, угловая скорость $\omega = 100\dots5000$ c^{-1} , давление на входе $p_0 = 0,15\dots0,25$ МПа.

Зависимость кинематических коэффициентов (жёсткости и демпфирования) от рабочих параметров и геометрии КСПС с водяной смазкой представлена на рисунках 4.5. Анализ полученных результатов показывает зависимость исследуемых коэффициентов КСПС от относительного радиального эксцентриситета, угловой скорости и угла конусности. При увеличении угловой скорости ω от 100 до 10^{-1} рад/с жёсткость КСПС существенно возрастает (рисунок 4а). С увеличением угла конусности жёсткость конического роликоподшипника остаётся практически постоянной в исследуемом диапазоне (рисунок 4б).

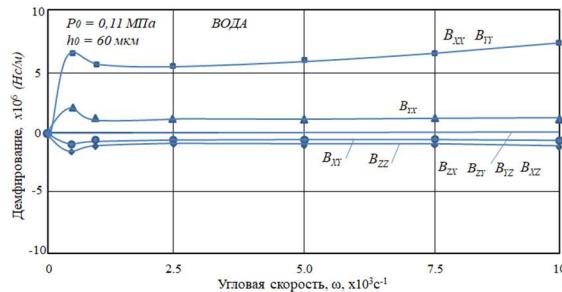


a

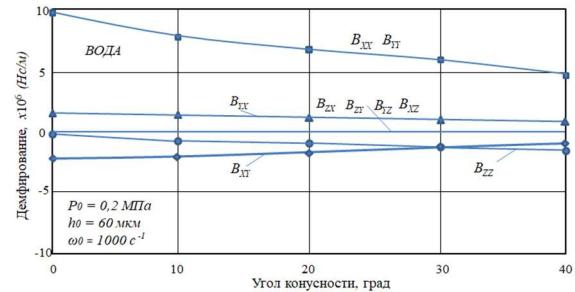


б

Рисунок 4 - Жесткость КЦПС



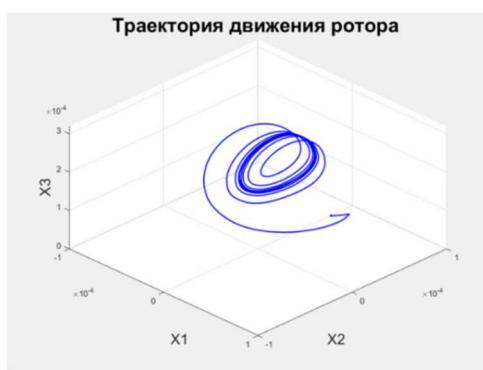
a



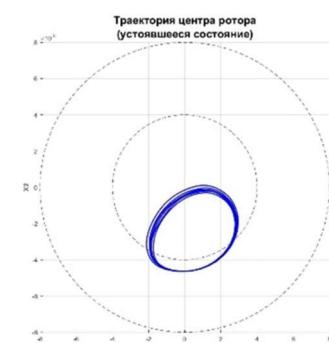
б

Рисунок 5 - Демпфирование КЦПС

На рисунках 5а и 5б показана зависимость между составляющими силы демпфирования (также называемой коэффициентом демпфирования) в жидкости (воде) под влиянием некоторых кинематических и геометрических параметров системы. На рисунке 5а показано влияние скорости вращения на силу демпфирования – в основном, плавные и устойчивые колебания. На рисунке 5б более наглядно показано влияние геометрии (угла конуса) на силу демпфирования – в частности, снижение общего коэффициента демпфирования. Представленные результаты расчета динамических коэффициентов позволяют проводить качественный и количественный анализ работоспособности конических опор и решать задачи устойчивости роторов быстроходных турбомашин на ЦПС.



a



б

Рисунок 6 - Траектория движения ротора

На рисунке 6 представлены результаты моделирования движения центра вала в коническом гидродинамическом подшипнике скольжения (КЦПС), выполненного траекторным методом. На рисунке 6 а представлена трёхмерная пространственная траектория ротора в системе координат (X1, X2, X3), показывающая сходимость движения к устойчивой траектории. На рисунке 6 б представлена проекция траектории центра вала на плоскость X1–X2, представляющая собой устойчивую эллиптическую траекторию, характеризующую состояние равновесия системы. Эта эллиптическая траектория наглядно отражает устойчивые колебательные свойства ротора в подшипнике, подтверждая результаты расчёта и корректность использованной динамической модели.

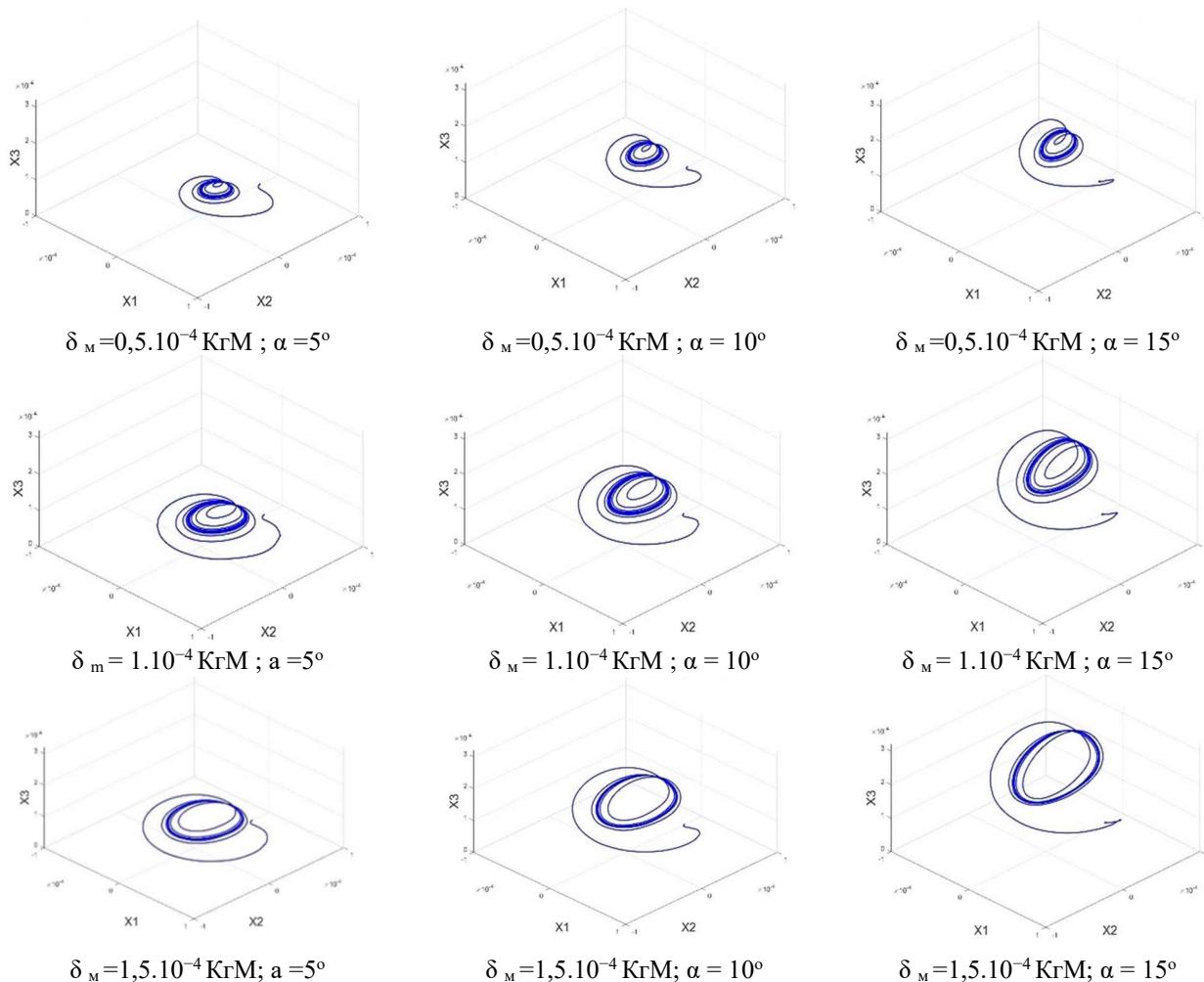


Рисунок 7 - 9 различных орбит центра вращения в пространстве

На рисунке 7 представлены 9 трёхмерных графиков, отображающих траекторию центра вращения в пространстве осей X1,X2,X3. Эти графики построены по двум параметрам вариации: δ_m – степень дисбаланса ($\text{Кг}\cdot\text{М}$) и α – угол наклона конуса ($^\circ$). При фиксированном δ_m , с увеличением угла α от 5° до 15° , траектория становится шире и искривленнее, что указывает на снижение устойчивости. При $\alpha = 5^\circ$ траектория становится более компактной, что указывает на более устойчивое движение. При фиксированном α , с увеличением дисбаланса δ_m от $0,5 \cdot 10^{-4}$ до $1,5 \cdot 10^{-4}$ Кг·М, траектория также расширяется, искривляется и имеет тенденцию к более сильным колебаниям. Это показывает, что больший дисбаланс приводит к менее устойчивому движению.

Заключение

Зависимость динамических характеристик КСПС получена с использованием разработанного авторами программного обеспечения. Предложенный метод расчета коэффициентов жесткости и демпфирования позволяет рассчитывать эти параметры для конических подшипников скольжения, аналогичных цилиндрическим подшипникам скольжения (предполагая угол конусности около 0°). Сочетание этих двух типов подшипников скольжения дает определенные результаты, помимо возможности сочетания различных геометрических форм со смазкой любой другой рабочей жидкостью. Полученные данные могут быть использованы при анализе устойчивости движения и расчете критических скоростей вращения высокоскоростных роторных систем с КСПС. Более глубокий динамический анализ роторной подшипниковой системы достигается путем изучения семейств траекторий, полученных при варьировании скорости, дисбаланса, массы ротора и давления подачи, геометрии подшипника (угла конуса, соотношения длин) и т. д., что позволяет определить устойчивость системы при заданных параметрах, а значит, рекомендовать наилучшие условия эксплуатации.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корнеев, А. Ю., Ярославцев, М. М. (2010) / Динамические характеристики конических многоэлементных гидродинамических подшипников жидкостного трения // Российские технические исследования, 30(4), 406–412.
2. Korneev, A. Yu. & Yaroslavtsev, M. M. (2010). Dynamic characteristics of conical multiple pad hydrodynamic liquid friction bearings. Russian Engineering Research, Vol. 30(4), pp. 365-369.
3. Корнеев А.Ю. Траекторная динамическая модель жесткого ротора на конических подшипниках // Известия ОрелГТУ, Фонд прикладных проблем техники и технологий, 2012, № 3_3/293, с. 3–9.
4. Кельзон А.С. / Динамика роторов в упругих опорах / А.С. Кельзон, Ю.П. Циманский, В.И. Яковлев. - М.: Наука. - 1982. -280 с. 12. Лу Л.Ю. / Теоретическое и экспериментальное исследование позиционно-управляемого полуактивного фрикционного гасителя колебаний для сейсмостойких сооружений / Л.Ю. Лу, Т.К. Лин, Р.Дж. Джэнг, Х.Х. Ву // Звук и вибрации. – 2018. – Т. 412. – С. 184 -206.
5. 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/ № 6 (362) 2023/ с. 35.
6. Казаков Ю.Н., Корнаев А., Корнаева Е., Шутин Д. / Снижение вибраций ротора в конических подшипниках скольжения, работающих с регулируемым зазором // Нелинейная динамика. Ижевский институт компьютерных исследований, 2022. Т. 18, № 5. С. 863–873.
7. Нгуен Тхай Ха/ Влияние структурных параметров на формирование полей гидродинамических давлений в радиально-упорных подшипниках жидкостного скольжения/ Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии DOI: 10.33979/2073-7408-2024-367-5-44-51/ с. 41.
8. Корнеев А.Ю., Савин Л.А., Соломин О.В. Конические подшипники жидкостного трения: монография // М.: Машиностроение-1, 2008. - 172 с.
9. Ganggrade, AK, Phalle, VM, & Mantha, SS (2018)/ Анализ устойчивости конических гидродинамических подшипников различной длины для условий переменной нагрузки. Труды Международной конференции по трибологии, Triboindia-2018, 13–15 декабря 2018 г., VJTI, Мумбаи, Индия.
10. Белоусов А.И. Теория и проектирование гидродинамических гасителей колебаний опор роторов / А.И. Белоусов, В.Б. Балякин, Д.К. Новиков. – Самара: Изд-во СНЦ РАН. – 2002. – 335с. – ISBN 5-93424-087-0.
11. Hong, G., Xinmin, L. & Shaoqi C. (2009). Theoretical and experimental study on dynamic coefficients and stability for a hydrostatic / hydrodynamic conical bearing. ASME Journal of Tribology, Vol. 131(701), pp. 1-7.
12. Pawar SR, Phalle VM, Sawant PK/ Влияние износа на динамический коэффициент сцепки и пороговую скорость гибридных конических подшипников с гидродинамическим сцеплением// Журнал Института инженеров (Индия): Серия С. 2023. Том 104, № 6. С. 1173–1180. Doi: 10.1007/s40032023 010004.
13. Ли СБ/ Конические статические и динамические подшипники скольжения с демпфированием, вращением и контролируемыми методами управления / СБ Ли, ЙФ Лю // Код CN112943792B.2021.
14. Sharma, S. C., Phalle, V. M. & Jain, S. C. (2011). Influence of wear on the performance of a multirecess conical hybrid journal bearing compensated with orifice restrictor. Tribology International, Vol. 44, pp. 1754-1764.

Нгуен Тхай Ха

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г Орёл
Аспирант
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. 8(991) 973-920-19
E-mail: havcn@mail.ru

Казаков Юрий Николаевич

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г Орёл
Аспирант
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. 8 (4862) 41 98 49
E-mail: kazakurii@yandex.ru

Шутин Денис Владимирович

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г Орёл
к.т.н., доцент кафедры мехатроники, механики и робототехники
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
8(919) 205-73-80
E-mail: rover.ru@gmail.com

Савин Леонид Алексеевич

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г Орёл
д.т.н., профессор, профессор кафедры мехатроники, механики и робототехники
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
8(4862) 41-98-49
E-mail: savin3257@mail.ru

NGUYEN THAI HA, Y.N. KAZAKOV, L.A. SAVIN

DYNAMIC CHARACTERISTICS OF CONICAL-CYLINDRICAL PLAIN BEARINGS

Abstract: This paper discusses the dynamic properties of tapered cylindrical plain bearings, such as stiffness, damping, and the trajectory method to determine the trajectory of the bearing outer surface center. The study examines how the shape, oil clearance, and load affect the stability and vibration resistance using a combination of fluid dynamic modeling and numerical methods. Compared with traditional cylindrical bearings, the tapered cylindrical design significantly increases the stiffness and damping according to the results, and the trajectory method helps in accurately

predicting the shaft vibration. The study proposes the best course of action for high-speed machine systems to improve their reliability and operating efficiency.

Keywords: damping, stiffness, angular contact fluid bearing, modeling, rotor, tapered fluid film bearing, equations of motion, trajectory method.

BIBLIOGRAPHY

1. Korneev, A. Yu., Yaroslavtsev, M. M. (2010) / Dynamic characteristics of conical multi-element hydrodynamic liquid friction bearings // Russian Engineering Research, 30(4), 406–412.
2. Korneev, A. Yu. & Yaroslavtsev, M. M. (2010). Dynamic characteristics of conical multiple pad hydrodynamic liquid friction bearings. Russian Engineering Research, Vol. 30(4), pp. 365–369.
3. Korneev, A. Yu. Trajectory dynamic model of a rigid rotor on tapered bearings // Bulletin of OrelSTU, Foundation for Applied Problems of Engineering and Technology, 2012, No. 3_3/293, pp. 3–9.
4. Kelzon, A.S. / Dynamics of rotors in elastic supports / A.S. Kelzon, Yu.P. Tsimansky, V.I. Yakovlev. - M.: Nauka. - 1982. -280 p. 12. Lu L.Yu. / Theoretical and experimental study of position-controlled semi-active friction damper for earthquake-resistant structures / L.Yu. Lu, TK Lin, R.J. Jeng, HH Wu // Sound and vibrations. - 2018. - T. 412. - P. 184 -206.
5. Marakhin N.A., Nguyen Thai Ha, Liu Yifan, Kazakov Yu.N., Savin L.A. / Hybrid Liquid Friction Bearings / Fundamental and applied problems of engineering and technology / No. 6 (362) 2023 / p. 35.
6. Kazakov Yu.N., Kornaev A., Kornaeva E., Shutin D. / Reducing rotor vibrations in tapered plain bearings operating with an adjustable clearance // Nonlinear dynamics. Izhevsk Institute of Computer Research, 2022. Vol. 18, No. 5. Pp. 863–873.
7. Nguyen Thai Ha / Influence of structural parameters on the formation of hydrodynamic pressure fields in radial thrust liquid plain bearings / Fundamental and applied problems of engineering and technology DOI: 10.33979/2073-7408-2024-367-5-44-51/ p. 41.
8. Korneev A.Yu., Savin L.A., Solomin O.V. Tapered Fluid Bearings: Monograph // Moscow: Mashinostroenie-1, 2008. - 172 p.
9. Gangrade, AK, Phalle, VM, & Mantha, SS (2018) / Stability Analysis of Tapered Hydrodynamic Bearings of Different Lengths under Variable Load Conditions. Proceedings of the International Conference on Tribology, Tribolina-2018, December 13–15, 2018, VJTI, Mumbai, India.
10. Beloussov, A.I. Theory and Design of Hydrodynamic Dampers for Rotor Supports / A.I. Beloussov, V.B. Balyakin, D.K. Novikov. - Samara: Publishing House of the Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. - 2002. - 335 p. - ISBN 5-93424-087-0.
11. Hong, G., Xinmin, L. & Shaoqi C. (2009). Theoretical and experimental study on dynamic coefficients and stability for a hydrostatic / hydrodynamic conical bearing. ASME Journal of Tribology, Vol. 131(701), pp. 1-7.
12. Pawar, S. R., Phalle, V. M., Sawant, P. K. Effect of wear on dynamic crosslinking coefficient and threshold speed of hybrid hydrodynamic clutch tapered roller bearings. Journal of the Institution of Engineers (India): Series C. 2023. Vol. 104, No. 6. P. 1173–1180. Doi: 10.1007/s40032023 010004.
13. Li SB/ Tapered static and dynamic plain bearings with damping, rotation, and controlled control methods / Li SB, Liu JF // Code CN112943792B.2021.
14. Sharma, S. C., Phalle, V. M. & Jain, S. C. (2011). Influence of wear on the performance of a multirecess conical hybrid journal bearing compensated with orifice restrictor. Tribology International, Vol. 44, pp. 1754-1764.

Nguyen Thai Ha

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel
Graduate student
302020, Orel, Naugorskoye shosse, 29
8(4862) 41–98–49
E-mail: havcn@mail.ru

Kazakov Yuri Nikolaevich

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel
Graduate student
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
Ph. 8 (4862) 41 98 49
E-mail: kazakyurii@yandex.ru

Shutin Denis Vladimirovich

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel
PhD, Associate Professor of the Department of
Mechatronics, Mechanics and Robotics
302020, Oryol, Naugorskoe shosse, 29
8(919) 205–73–80
E-mail: rover.ru@gmail.com

Savin Leonid Alekseevich

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel
Doctor of sciences, professor, professor at the
department of mechatronics, mechanics and robotics
302020, Orel, Naugorskoye shosse, 29
8(4862) 41–98–49
E-mail: savin3257@mail.ru

© Нгуен Тхай Ха, Казаков Ю.Н., Шутин Д.В., Савин Л.А., 2025

ГОРИН А.В., РОДИЧЕВ А.В., ЯКОВЛЕНКО О.В., ВАСИЛЬЕВ К.В.

КОНЦЕПЦИЯ МЕХАТРОННОГО ПОДШИПНИКА СКОЛЬЖЕНИЯ С МЕХАНИЗМОМ АДАПТАЦИИ К РЕЖИМАМ ТРЕНИЯ

Аннотация. В статье представлен краткий анализ развития подшипниковых узлов скольжения. Предложена концепция конструкции мехатронного подшипникового узла скольжения с механизмом адаптации к режимам трения. Показаны результаты теоретических расчетов, подтверждающие возможность образования режима адаптации подшипникового узла к различным условиям работы. Сформулированы выводы и рекомендации для дальнейших исследований предложенной конструкции мехатронного подшипника скольжения с механизмом адаптации к режимам работы.

Ключевые слова: подшипник скольжения, мехатроника, режим работы, трение, адаптация.

Введение

В высокоскоростных роторных машинах использование подшипников скольжения жидкостного трения фактически не имеет достойной альтернативы. По сравнению с подшипниками качения они обладают существенными преимуществами [1-3]: способностью работать в широком диапазоне скоростей вращения, повышенным рабочим ресурсом, компактными размерами и меньшей массой, эффективным гашением вибраций, устойчивостью к температурным и химическим воздействиям, а также пониженным уровнем шума при эксплуатации.

Подшипники скольжения в роторных машинах должны соответствовать ряду ключевых критериев: обладать высокой нагрузочной способностью при компактных размерах, обеспечивать низкий коэффициент трения и износостойкость в течение всего срока службы, требовать минимального расхода смазки, демонстрировать устойчивость к вибрациям в рабочих и переходных режимах, а также иметь простую и технологичную конструкцию, удобную в обслуживании [4, 5].

Способность функционировать опорных узлов в машиностроении на переходных режимах, связанных с пуском - остановом агрегата и резком возрастании нагрузки является одной из серьезных проблем. Для эффективного восприятия переменных усилий преимущественно используют подшипники жидкостного трения различного конструктивного исполнения. Предложено применение модифицированной геометрии подшипника, в которой внутреннее кольцо имеет сферическую форму, а внешнее — сферическую, что позволяет добиться более равномерного распределения нагрузки [6]. Имеются различные исследования трибологического поведения композитной смазочной системы [7, 8]. Применяется конструкция пористого подшипника скольжения, смазываемого наножидкостью, с учетом взаимодействия между смазочной пленкой и пористым эластичным материалом втулки [9, 10]. Исследовалось влияние текстурирования поверхности на гидродинамические характеристики подшипника [11], а так же рассматривалась конструкция подшипника скольжения с самоустанавливающимися сегментами [12]. Однако каждое исследование и разработка обладает своими недостатками.

Поиски новых конструктивных решений подшипников скольжения является актуальной задачей, позволяющей создать подшипниковый узел обладающий механизмом адаптации к режимам трения.

Основная часть

В результате анализа литературных источников и патентного поиска была определена структурно функциональная схема роторно-опорного узла в состав которой входит мехатронный подшипник скольжения с механизмом адаптации к режимам трения. Схема роторно-опорного узла с мехатронным подшипником скольжения с механизмом адаптации к режимам трения представлен на рисунке 1.

Принцип работы роторно-опорного узла с мехатронным подшипником скольжения с механизмом адаптации к режимам трения заключается в следующем.

Подшипник скольжения имеет наружную обойму 1 и внутреннюю втулку 2, соединенные с помощью крышки 3. Поверхность внутренней втулки 2 имеет структурированную поверхность в виде сквозных круглых каналов, через которые проникает рабочая жидкость. Обойма 1, внутренняя втулка 2 и крышка 3 образуют полость, заполненную рабочей жидкостью. В этой полости находятся нагревательные элементы 4, предназначенные

для быстрого разогрева рабочей жидкости. Контроль температуры нагревательного элемента и рабочей жидкости производиться датчиками температуры 5 и 6 соответственно.

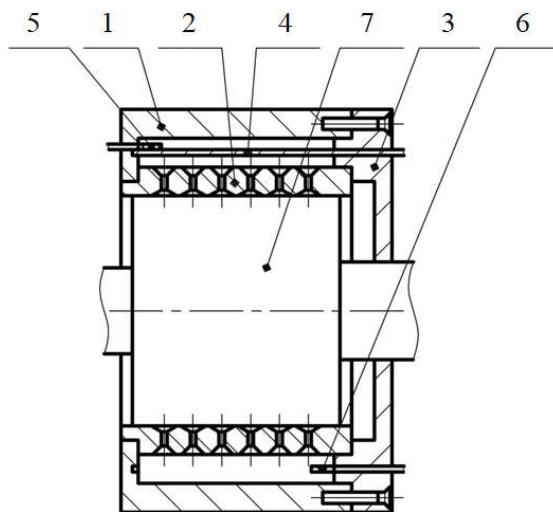


Рисунок 1 – Схема роторно-опорного узла с мехатронным подшипником скольжения с механизмом адаптации к режимам трения

В процессе пуска и переходных режимах работы механизма вал 7 может вращаться с частотами вращения ниже 1000 об/мин, что соответствует режиму граничного трения. Для обеспечения режима жидкостного трения необходимо подать рабочую жидкость в зазор между рабочими поверхностями вала 7 и внутренней втулки 2. Подача рабочей жидкости осуществляется путем нагрева рабочей жидкости нагревательными элементами 4. Во время нагрева объем рабочей жидкости увеличивается и она поступает в рабочую зону между валом 7 и внутренней втулкой 2. Контроль процесса нагрева рабочей жидкости и нагревательных элементов 4 производиться датчиками температуры 5 и 6.

Для оценки возможности осуществления жидкостного режима рассчитаем объем рабочей жидкости выделяемой при нагреве и сравним с объемом жидкости в зазоре подшипника скольжения.

Объем жидкости в зазоре подшипника скольжения (рисунок 2) определяем по формуле;

$$V_3 = S_3 \cdot L_3 \quad (1)$$

где S_3 – площадь кольцевого сечения зазора подшипника скольжения;

L_3 – длина рабочей поверхности подшипника скольжения;

$L_3 = 40 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

$$S_3 = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} = \frac{3,14 \cdot ((40 \cdot 10^{-3})^2 - (39,75 \cdot 10^{-3})^2)}{4} = 1,57 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2;$$

где $D = 40 \cdot 10^{-3}$ – диаметр втулки подшипника скольжения;

$d = 39,75 \cdot 10^{-3}$ – диаметр ступени вала под подшипник скольжения

$$V_3 = 1,57 \cdot 10^{-5} \cdot 40 \cdot 10^{-3} = 6,28 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3$$

Объем жидкости в рабочей камере подшипника скольжения (рисунок 3) находится по формуле:

$$V_k = S_k \cdot L_k \quad (2)$$

где S_k – площадь кольцевого сечения рабочей камеры подшипника скольжения;

L_k – длина рабочей камеры подшипника скольжения;

$L_k = 40 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

$$S_k = \frac{\pi}{4} (D_1^2 - d_1^2)^2 = \frac{3,14}{4} (60 \cdot 10^{-3} - 50 \cdot 10^{-3})^2 = 8,64 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

где $D_1 = 60 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – больший диаметр рабочей камеры;

$d_1 = 50 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – меньший диаметр рабочей камеры.

$$V_k = 8,64 \cdot 10^{-4} \cdot 40 \cdot 10^{-3} = 3,45 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$$

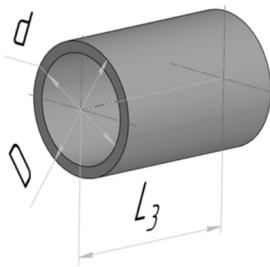


Рисунок 2 – Схема рабочего зазора подшипника скольжения

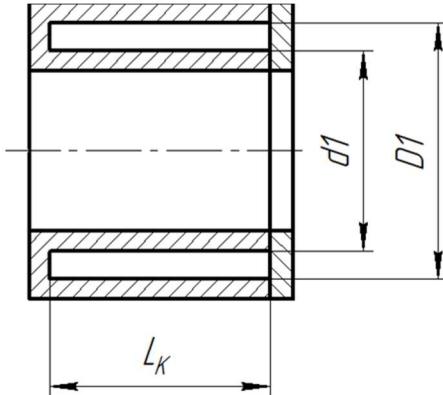


Рисунок 3 – Схема рабочей камеры подшипника скольжения

Площадь отверстий на рабочей поверхности втулки подшипника скольжения (рисунок 2.3.) определим по формуле:

$$S_{\Sigma} = S_o \cdot n \quad (3)$$

где $n = 18 \times 70 = 1240$ отв. – число отверстий на рабочей поверхности втулки подшипника;
 S_o – площадь одного отверстия

$$S_o = \frac{\pi}{4} d_o^2 = \frac{3,14}{4} (0,8 \cdot 10^{-3})^2 = 0,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2,$$

где $d_o = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ – диаметр отверстия канала на рабочей поверхности втулки подшипника

Сравним удвоенную площадь кольцевого сечения зазора подшипника скольжения и площадь отверстий на рабочей поверхности втулки подшипника скольжения:

$$2 \cdot S_3 < S_o$$

$$2 \cdot 1,57 \cdot 10^{-5} < 0,74 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

Анализ полученных результатов показывает, что площадь отверстий на рабочей поверхности втулки подшипника скольжения гораздо больше, чем удвоенная площадь кольцевого сечения зазора подшипника скольжения. Следовательно, вытесняемая жидкость будет оставаться в рабочем зазоре подшипника скольжения.

Изменение объема жидкости в рабочей камере при нагреве определим из зависимости коэффициента теплового расширения рабочей жидкости:

$$\beta_t = \frac{1}{V_k} \cdot \frac{\Delta V_k}{\Delta t};$$

$$\Delta V_k = \beta_t \cdot V_k \cdot \Delta t \quad (4)$$

где β_t – коэффициент теплового расширения.

Для рабочей жидкости И-20 и рабочей температуре 20-50°C
 $\beta_t = 556 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$

$$\Delta V_k = 556 \cdot 10^{-6} \cdot 3,45 \cdot 10^{-5} \cdot 1 = 0,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$$

Сравним объем в зазоре подшипника скольжения и изменение объема жидкости в рабочей камере при нагреве:

$$V_3 > \Delta V_k$$

$$6,28 \cdot 10^{-6} > 0,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$$

Объем вытесняемой жидкости меньше чем объем в зазоре подшипника скольжения. Определим коэффициент заполнения зазора по формуле:

$$K = \frac{V_3 - \Delta V_k}{V_3} = \frac{6,28 \cdot 10^{-6} - 0,9 \cdot 10^{-6}}{6,28 \cdot 10^{-6}} = 0,86$$

Полученный коэффициент заполнения соответствует нагреву рабочей жидкости на 1°C, если будет нагрев жидкости на большее значение, то коэффициент будет уменьшаться до минимального значения.

Выводы

Результаты расчетных зависимостей позволяет сделать вывод о возможности изменения режима скольжения, т.е. возникает механизм адаптации к режимам трения подшипника скольжения.

Таким образом, представленный роторно-опорный узел имеет возможность адаптироваться к режимам трения, путем изменения количества рабочей жидкости в зазоре подшипниковой пары скольжения, что обеспечивает требуемые условия эксплуатации.

Данный эффект адаптации возможно применять при начальном запуске и холостом ходу роторно-опорных узлов работающих на крайнем севере и в условиях вечной мерзлоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артеменко, Н. П. Газожидкостные опоры роторов криогенных турбонасосных агрегатов [Текст] / Н. П. Артеменко [и др.] – М. : КБ Химмаш, 1993. – 146 с.
2. Давыдов, А. Б. Расчет и конструирование турбодетандеров [Текст] / А. Б. Давыдов, А. Ш. Кобулашвили, А. Н. Шерстюк – М. Машиностроение, 1987. – 230 с.
3. Бондаренко, М.Э. Анализ экспериментальных исследований активной комбинированной опоры ротора / М.Э. Бондаренко, Р.Н. Поляков, М.А. Токмакова, А.Д. Серебренников // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №1(357) – 2023. С.133 – 140.
4. Майоров, С.В. Исследование динамики ассиметричного ротора в активных комбинированных опорах / С.В. Майоров, М.Э. Бондаренко, М.А. Токмакова, В.А. Позднякова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева – № 3 (353) -2022 – С. 73-82.
5. Бондаренко, М.Э. Комбинированный подшипниковый узел с изменяемыми жёсткостными и демпфирующими характеристиками / М.Э. Бондаренко, Р.Н. Поляков, А.В. Горин, В.А. Позднякова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева - №5(355) – 2022. С.51 – 58.
6. R. Siva Srinivas, R. Tiwari, Ch. Kannababu Application of active magnetic bearings in flexible rotordynamic systems – A state-of-the-art review Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 106, June 2018, Pages 537-572.
7. Kai Feng, Han-Qing Guan, Zi-Long Zhao, Tian-Yu Liu Active bump-type foil bearing with controllable mechanical preloads Tribology International, Volume 120, April 2018, Pages 187-202.
8. Heshmat H, Shapiro W, Gray S. Development of foil journal bearings for high load capacity and high speed whirl stability. J Tribol 1982;104:149–56..
9. Jorge G. Salazar, Ilmar F. Santos Active tilting-pad journal bearings supporting flexible rotors: Part I – The hybrid lubricationTribology International, Volume 107, March 2017, Pages 94-105.
10. Athanasios Chasalevris, Fadi Dohnal Improving stability and operation of turbine rotors using adjustable journal bearings Tribology International, Volume 104, December 2016, Pages 369-382.
11. Jorge G. Salazar, Ilmar F. Santos Active tilting-pad journal bearings supporting flexible rotors: Part II-The model-based feedback-controlled lubrication Tribology International, Volume 107, March 2017, Pages 106-115.
12. Asger M. Haugaard, Ilmar F. Santos Multi-orifice active tilting-pad journal bearings—Harnessing of synergetic coupling effects Tribology International, Volume 43, Issue 8, August 2010, Pages 1374-1391.

Горин Андрей Владимирович

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

Родичев Алексей Юрьевич

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

Яковленко Оксана Владимировна

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел
студент
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 29
E-mail: aksacha79@mail.ru

Васильев Кирилл Владимирович

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

GORIN A.V., RODICHEV A.Yu., YAKOVLENKO O.V., VASILIEV K.V.

CONCEPT OF MECHATRONIC SLIDING BEARING WITH AN ADAPTATION MECHANISM TO FRICTION MODES

Abstract. The article presents a brief analysis of the development of plain bearing units. The concept of the design of a mechatronic plain bearing unit with a mechanism for adapting to friction modes is proposed. The results of theoretical calculations are shown, confirming the possibility of forming a mode of adaptation of the bearing unit to various operating conditions. Conclusions and recommendations for further studies of the proposed design of a mechatronic plain bearing with a mechanism for adapting to operating modes are formulated.

Keywords: plain bearing, mechatronics, operating mode, friction, adaptation.

BIBLIOGRAPHY

1. Artemenko, N. P. Gas-liquid bearings of rotors of cryogenic turbopump units [Text] / N. P. Artemenko [et al.] - M.: KB Khimmash, 1993. - 146 p.
2. Davydov, A. B. Calculation and design of turboexpanders [Text] / A. B. Davydov, A. Sh. Kobulashvili, A. N. Sherstyuk - M. Mechanical Engineering, 1987. - 230 p.
3. Bondarenko, M.E. Analysis of experimental studies of an active combined rotor support / M.E. Bondarenko, R.N. Polyakov, M.A. Tokmakova, A.D. Serebrennikov // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: Orel State University named after I.S. Turgenev, No. 1 (357) – 2023. P. 133 – 140.
4. Mayorov, S. V. Study of the dynamics of an asymmetric rotor in active combined supports / S. V. Mayorov, M. E. Bondarenko, M. A. Tokmakova, V. A. Pozdnyakova // Fundamental and applied problems of engineering and technology. – Orel: I. S. Turgenev State University – No. 3 (353) 2022 – P. 73-82.
5. Bondarenko, M. E. Combined bearing unit with variable stiffness and damping characteristics / M. E. Bondarenko, R. N. Polyakov, A. V. Gorin, V. A. Pozdnyakova // Fundamental and applied problems of engineering and technology. Orel: I. S. Turgenev No. 5 (355) – 2022. P. 51 – 58.
6. R. Siva Srinivas, R. Tiwari, Ch. Kannababu Application of active magnetic bearings in flexible rotordynamic systems – A state-of-the-art review Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 106, June 2018, Pages 537-572.
7. Kai Feng, Han-Qing Guan, Zi-Long Zhao, Tian-Yu Liu *Active bump-type foil bearing with controllable mechanical preloads* Tribology International, Volume 120, April 2018, Pages 187-202.
8. Heshmat H, Shapiro W, Gray S. Development of foil journal bearings for high load capacity and high speed whirl stability. J Tribol 1982;104:149–56..
9. Jorge G. Salazar, Ilmar F. Santos Active tilting-pad journal bearings supporting flexible rotors: Part I – The hybrid lubricationTribology International, Volume 107, March 2017, Pages 94-105.
10. Athanasios Chasalevris, Fadi Dohnal Improving stability and operation of turbine rotors using adjustable journal bearings Tribology International, Volume 104, December 2016, Pages 369-382.
11. Jorge G. Salazar, Ilmar F. Santos *Active tilting-pad journal bearings* supporting flexible rotors: Part II-The model-based feedback-controlled lubrication Tribology International, Volume 107, March 2017, Pages 106-115.
12. Asger M. Haugaard, Ilmar F. Santos Multi-orifice *active tilting-pad journal bearings*—Harnessing of synergetic coupling effects Tribology International, Volume 43, Issue 8, August 2010, Pages 1374-1391.

Polyakov Roman Nikolaevich

Orel State University

Associate professor of the department mechatronics,
mechanics and robotics

302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
E-mail: romanpolak@mail.ru

Rodichev Alexey Yuryevich

Orel State University

Associate professor of the department mechatronics,
mechanics and robotics

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

Yakovlenko Oksana Vladimirovna

Orel State University

student

302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
E-mail: aksacha79@mail.ru

Vasiliev Kirill Vladimirovich

Orel State University named after I.S. Turgenev

student

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

© Горин А.В., Родичев А.В., Яковленко О.В., Васильев К.В., 2025

КЮРКЧУ И.А., ПОВАДЫРЬ В.Д., ЗАСОРИН Е.М., КОЛОМИЕЦ Е.В., КОМАРОВ А.Г.

РАЗРАБОТКА РОБОТИЗИРОВАННОГО МОДУЛЯ ПИПЕТИРОВАНИЯ

Аннотация. Рост числа пациентов и выполняемых в клинических лабораториях исследований требует внедрения принципиально новых модульных технологий автоматизации. Одним из наиболее трудоемких традиционно выполняемых вручную процессов является пипетирование, которое не только занимает значительное время лабораторных сотрудников, но и оказывает негативное воздействие на их здоровье. Цель работы – разработка универсального роботизированного модуля пипетирования, позволяющего повысить эффективность, воспроизводимость и безопасность данной процедуры в условиях клинической лаборатории. Разработан и создан роботизированный пипетирующий модуль, который может быть установлен в клинические лаборатории без существенных изменений инфраструктуры. Проведенные испытания показали стабильность работы системы: среднее время пипетирования одной микропробирки составило 7 секунд, что в 2,5 раза быстрее ручной процедуры, а точность дозирования соответствует заявленной точности используемой механической пипетки. Конструкция обеспечивает удобство обслуживания, модульность и возможность дальнейшей модернизации.

Ключевые слова: коллаборативный робот, пипетирование; автоматизация, рутинные процессы, здравоохранение, клиническая лаборатория.

Введение

Современные тенденции в здравоохранении требуют от инженеров медицинской техники и разработчиков средств автоматизации инновационного подхода к решению актуальных проблем, возникающих в условиях стабильного роста основных производственных показателей клинических лабораторных центров – количества пациентов, количества поступаемого биоматериала и количества производимых исследований [1, 2]. Перспективным направлением инновационно-технологического развития системы здравоохранения является автоматизация рутинных лабораторных процессов для обеспечения их эффективности, точности, воспроизводимости и безопасности, а также для повышения качества предоставляемых медицинских услуг.

В частности, одним из традиционно выполняемых вручную рутинным процессом в рамках проведения лабораторных исследований является пипетирование жидкостей или реагентов с использованием ручных одноканальных и многоканальных дозаторов различных объемов. Стоит отметить, что ручная процедура пипетирования весьма трудозатратна и требует большого количества времени для выполнения одного цикла работы, который включает в себя взятие механической пипетки, фиксацию одноразового наконечника, набор жидкости или реагента, опустошение содержимого в специальную подготовленную емкость и утилизацию одноразового наконечника. Согласно национальным стандартам, выполнение данной процедуры должно занимать не более 17 секунд [3, 4].

Помимо проблемы большой длительности выполнения одной итерации цикла пипетирования, существуют и другие: неточность дозирования малых объемов жидкостей [5] и негативное влияние длительного выполнения процедуры на здоровье рук работников [6-8].

Рассматриваемая процедура состоит из простой последовательности действий, которая может быть эффективно автоматизирована с применением различных подходов. На данный момент существует множество автоматизированных решений по выполнению полного цикла анализа, в том числе пипетирование с использованием микропробирок типа эпендорф и различными кюветами. Однако, в силу отсутствия необходимых режимов работы, данные автоматизированные технологии не способны решить проблемы ручной пробоподготовки и дозирования.

Одним из универсальных примеров автоматизации процесса пипетирования является модифицированная с помощью пневмоцилиндров стандартная одноканальная механическая пипетка, разработанная румынскими специалистами [9]. Конструкция крепится к фланцу коллаборативного робота, а управление процедурой осуществляется за счет переключения клапанов пневмолинии, подведенной к инструменту. Однако предложенный подход имеет ряд

недостатков: а) необходимость наличия компрессора в модульной автоматизированной системе, способный в процессе работы вызывать нежелательные вибрации, или пневмолинии, которые проведены далеко не во всех клинических лабораторных центрах; б) резкое нажатие на регулируемый поршень механической пипетки ходовой частью пневмоцилиндра, которое может привести как к неточному дозированию, так и к несвоевременному выходу устройства из строя; в) открытая незащищенная конструкция, которая подвергает опасности исполняющий механизм инструмента при столкновении коллaborативного робота с препятствием; г) погрешности регулирования давления внутри пневмолинии.

Для автоматизации процесса пипетирования необходима универсальная модульная конструкция, которая сможет не только беспрепятственно встроиться в любую лабораторию, но и бесперебойно и с высокой точностью выполнять свою целевую функцию на протяжении долгого промежутка времени.

Основная часть

Далее необходимо рассмотреть этапы разработки роботизированного модуля для осуществления процедуры пипетирования, выполняемой специалистами Московского научно-практического центра лабораторных исследований (далее – МПНПЦЛИ). Разработанный роботизированный модуль полностью закрывает потребности в пипетировании одного из лабораторных центров учреждения. Основными критериями в процессе разработки модуля являлись:

1. Применение коллаборативного робота в качестве исполняющей операции единицы;
2. Разрабатываемый автоматизированный модуль должен универсально и эффективно встраиваться в большинство лабораторных центров, не внося существенных изменений в существующие бизнес-процессы;
3. Разрабатываемый инструмент для пипетирования должен состоять только из механических частей, не создающих излишнюю вибрацию и обеспечивающих достаточную плавность выполнения операции, и не должен зависеть от оснащения лабораторного центра;
4. Разрабатываемый роботизированный модуль должен содержать специально разработанный паллет для правильной и одинаковой установки микропробирок типа эпендорф, стойку для сменных наконечников и защищенную от пыли емкость для жидкости или реагентов.

При разработке было принято решение, что механическая пипетка должна быть жестко закреплена на фланце коллаборативного робота в качестве исполнительного инструмента. Процесс пипетирования состоит из следующих этапов:

1. Фиксация одноразового наконечника на механической пипетке;
2. Проверка уровня жидкости в емкости;
3. Набор жидкости из специально подготовленной емкости;
4. Опустошение содержимого механической пипетки в микропробирки;
5. Сброс одноразового наконечника в корзину утилизации.

Рассмотренная последовательность действий позволяет сформировать цикл, который может быть эффективно реализован и распространен на большое количество микропробирок в рамках одного роботизированного модуля.

В качестве основной исполняющей единицы был выбран шестиосевой коллаборативный робот. Выбранная модель обладает классом защиты IP67 (полная пыленепроницаемость и защита от кратковременного погружения в воду на глубину до 1 метра на 30 минут), что позволяет безопасно использовать ее в лабораторных условиях, множеством аналоговых и цифровых выходов для подключения периферийных устройств и качественной интегрированной средой разработки (IDE), которая дает возможность удобно настраивать перемещения робота и обмен данными с ним.

Для автоматизации выполнения необходимых операций необходимо было также подобрать или разработать ряд компонентов: механическую пипетку и одноразовые наконечники для нее; механизм, выполняющий нажатие на поршень пипетки для осуществления набора и слива жидкости; паллет для установки, фиксации и правильного ориентирования микропробирок; емкость для жидкости и площадку для ее надежной

фиксации; датчик контроля уровня жидкости в емкости; механизм для сброса отработанного наконечника; стол-платформу для размещения всех элементов роботизированного модуля; быстросъемный защитный кожух для автоматизированного пипетирующего механизма.

В качестве дозатора жидкости была выбрана одноканальная механическая пипетка переменного объема 10-1000 мкл Eppendorf Research plus, которая обеспечивает высокую точность и массово производится в настоящее время (рисунок 1). Выбранная модель обладает двумя нажимными поршнями: центральный отвечает за набор (нажатие на поршень и смещение его до синего разграничителя) и за слив (полное нажатие поршня) жидкости, боковой – за сброс одноразового наконечника [10].



Рисунок 1 – Одноканальный дозатор переменного объема Eppendorf Research plus

В качестве исполнительного инструмента была разработана конструкция, представленная на рисунке 2.

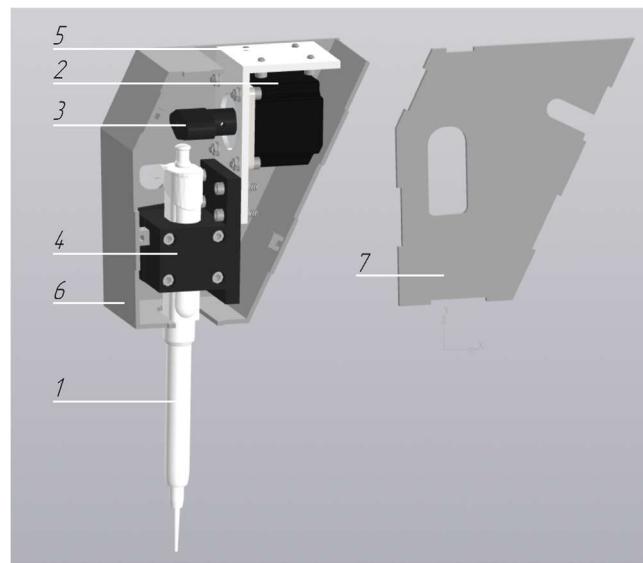


Рисунок 2 – Исполнительный инструмент:

1 – механическая пипетка; 2 – шаговый электродвигатель; 3 – эксцентриковый кулачок; 4 – крепежная конструкция механической пипетки; 5 – крепежный фланец; 6 – защитный кожух; 7 – съемная крышка защитного кожуха

Исполнительный инструмент крепится к стандартному фланцу коллaborативного робота посредством ответной части (5) [11]. Механическая пипетка (1) фиксируется с помощью крепежной конструкции (4). Защитный кожух (6) крепится к крепежной конструкции механической пипетки (4) и крепежному фланцу (5) посредством болтового соединения. Съемная крышка (7) с помощью магнитов фиксируется на основной части защитного кожуха (6). В процессе работы шаговый электродвигатель (2) по сигналу коллaborативного робота вращает вал, на котором закреплен эксцентриковый кулачок (3). Части разных диаметров эксцентрикового кулачка (3) поочередно нажимают на поршень механической пипетки (1), обеспечивая забор жидкости при воздействии части с меньшим диаметром и ее дозирование при воздействии части с большим диаметром.

Разработанная конструкция, благодаря наличию быстросъемной крышки кожуха, позволяет оперативно производить сервисные работы или подналадку – заменять механическую пипетку, изменять дозируемый объем жидкости, калибровать начальное положение эксцентрикового кулачка.

Разработанная модульная станция в составе коллaborативного робота, исполнительного инструмента и всех функциональных блоков представлена на рисунке 3.

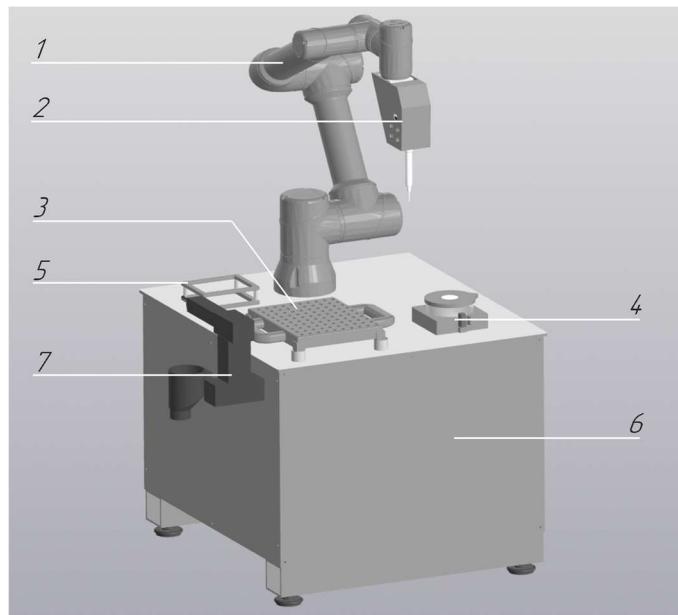


Рисунок 3 – Разработанный роботизированный модуль пипетирования:

1 – коллаборативный робот; 2 – исполняющий инструмент; 3 – паллет для микропробирок; 4 – блок установки емкости с жидкостью и контролем ее уровня; 5 – бокс хранения одноразовых наконечников; 6 – стол-платформа; 7 - конструкция сброса наконечников

Коллaborативный робот (1) с закрепленным исполняющим инструментом (2), паллетом для микропробирок (3), блоком установки емкости с жидкостью (4), боксом для хранения одноразовых наконечников (5) и конструкцией сброса наконечников (7) крепятся на столе платформе (6). В процессе работы коллaborативный робот (1) надевает на исполняющий инструмент (2) одноразовый наконечник из специального бокса (4) и движется к емкости с жидкостью (5), где происходит ее забор – после робот движется к паллету (3) и дозирует жидкость в микропробирку. При необходимости замены наконечника робот движется к специальной конструкции (7) и нажимает на поршень сброса механической пипетки исполнительного инструмента (2) через специальное отверстие в его кожухе.

Паллет для микропробирок (3) вмещает 100 микропробирок, отличительной его особенностью является необходимость позиционирования крышечек микропробирок, что позволяет их жестко зафиксировать для безопасного проведения последующих операций и переноса.

Блок для установки емкости с жидкостью (4) предусматривает установку лабораторной чаши, содержит крышку с силиконовыми лепестками, предотвращающими контакт содержимого с внешней средой, и место для крепления датчика, определяющего уровень жидкости [12].

Стол-платформа (6) представляет собой модульную конструкцию со съемными боковыми стенками, колонной для установки коллаборативного робота и местом для электромонтажа.

Управление процессом пипетирования осуществляется посредством двух механизмов: программного кода коллаборативного робота, разработанного внутри его IDE, и программируемого логического контроллера (далее – ПЛК). Оба рассматриваемых элемента обмениваются данными посредством цифровых входов-выходов.

ПЛК управляет вращением вала двигателя посредством отправки серии сигналов, преобразуемых драйвером шагового двигателя (microstep driver) в импульсы напряжения, которые поочередно приходят на обмотки. Серия сигналов отправляется ПЛК после получения им команды от сервера коллаборативного робота о достижении необходимой части программного кода (необходимо наполнить или опустошить пипетку).

Исполняемый программный код коллаборативного робота выполняет следующую последовательность действий:

1. Инициализация коллаборативного робота и его перемещение в стартовую позицию;
2. Проверка уровня жидкости в емкости с помощью специального датчика: при недостатке жидкости программа не начнет исполнение, и робот подает сигнал оператору;
3. Исполнительный инструмент коллаборативного робота надевает одноразовый наконечник;
4. Происходит движение к емкости, из которой забирается жидкость: наконечник опускается в жидкость на рекомендуемую в документации глубину [10];
5. Робот отправляет команду ПЛК о необходимости проворачивать вал шагового двигателя для поворота эксцентрикового кулачка и набора жидкости в механическую пипетку из емкости;
6. Происходит движение к конкретной ячейке паллета с микропробирками (в соответствии с номером итерации);
7. Робот отправляет команду ПЛК о необходимости проворачивать вал шагового двигателя для проворота эксцентрикового кулачка и слива жидкости из дозатора в микропробирку;
8. При многократном использовании наконечника цикл повторяется, в противном случае робот движется в зону утилизации наконечника.

Блок-схема разработанного алгоритма представлена на рисунке 4.

В качестве материала для создания паллетов, блока забора жидкости, кейса для наконечников и конструкции крепления инструмента и шагового двигателя был использован полиэтилентерефталат-гликоль (далее – ПЭТГ) – химически инертный, устойчивый к воздействиям разбавленных растворов кислот, щелочей и солей, мылам и спиртам пластик [13-15].

Для изготовления кожуха для конструкции инструмента коллаборативного робота был использован листовой полистирол как простой в обработке, биологически инертный материал [13-15].

Для изготовления стола-платформы была использована листовая сталь с порошковым окрашиванием (облицовка и основание) и нержавеющая медицинская сталь (столешница), что обеспечивает прочность, устойчивость и защиту от коррозии даже при попадании дозируемых растворов на рабочую поверхность или ее обработку дезинфицирующими средствами.

Подобранные материалы для создания автоматизированного пипетирующего модуля идеально подходят для безопасного его размещения внутри клинических лабораторий.

В результате сборки и установки всех разработанных и выбранных комплектующих создана модульная автоматизированная ячейка, габариты которой позволяют разместить ее в

большинстве клинических лабораторий без осуществления дополнительных перепланировок помещения и переноса анализирующего и пробоподготавливающего оборудования.

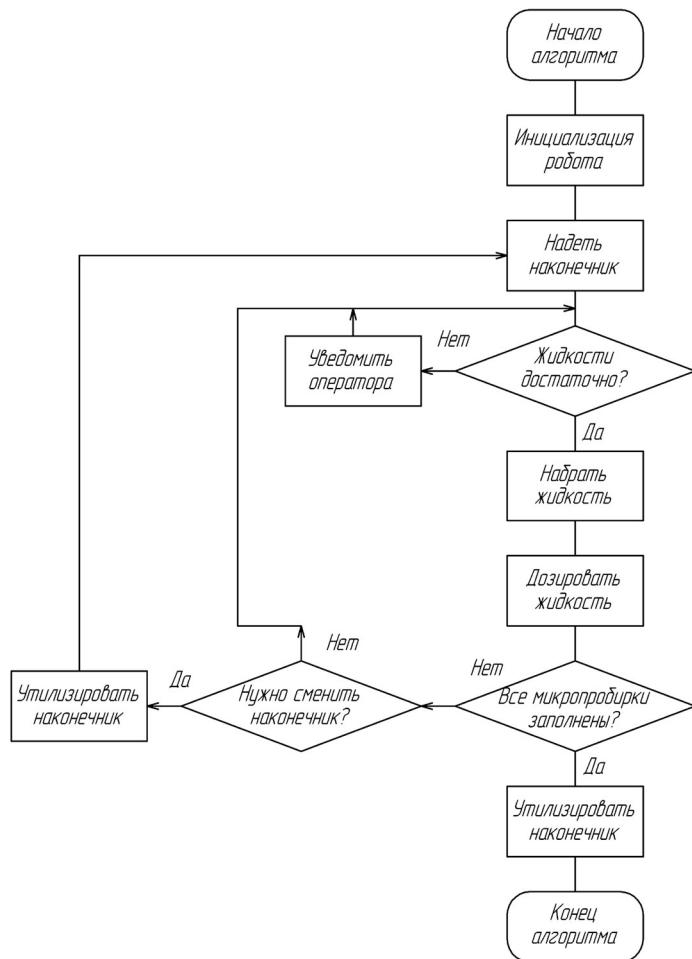


Рисунок 4 – Блок-схема работы роботизированного пипетирующего модуля

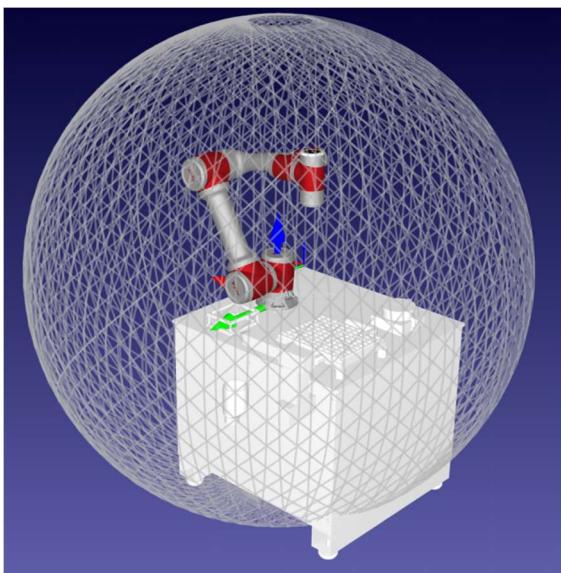
Тестирование работоспособности разработанной роботизированной системы производилось в рамках многократной проверки полного цикла обхода 100 микропробирок, в каждую из которых дозировалось 700 мкл физиологического раствора. Как результат, найдены оптимальные точки для взятия одноразовых наконечников и пипетирования жидкости без создания брызг; подобрана оптимальная скорость движений, оптимизирующая процесс и не приводящая к излишним вибрациям и нестабильности всей конструкции; выбрано наилучшее расположение основных блоков – емкости с жидкостью, паллетов, бокса хранения наконечников, конструкции сброса наконечников, позволяющее минимизировать количество линейных перемещений робота и, как следствие, увеличить скорость выполнения одной итерации.

После оптимизации пространства рабочей поверхности и настроек движения коллaborативного робота произведена серия замеров для оценки времени, необходимого на пипетирование полного паллете микропробирок. Полученные данные свидетельствуют о практически постоянном времени выполнении полного цикла дозирования (700-705 секунд), что подтверждает высокую стабильность разработанного роботизированного модуля.

При перерасчете полученного времени на одну микропробирку среднее время одной итерации пипетирования занимает 7 секунд, что почти в 2,5 раза быстрее нормированного промежутка в 17 секунд для ручного выполнения данной процедуры [3, 4].

Точность дозирования, согласно проведенным замерам, соответствует заявленной погрешности выбранной механической одноканальной пипетки, что полностью удовлетворяет требованиям выполнения процедуры.

Для дополнительной проверки стабильности работы автоматизированного модуля была произведена его установка в клиническую лабораторию, в которой на протяжении трех месяцев ежедневно производилось не менее 10 полных циклов дозирования от 1000 до 1500 микропробирок (рисунок 5).



а)



б)

Рисунок 5 – Разработанный пипетирующий автоматизированный модуль:
а – зона досягаемости коллaborативного робота; б – экспериментальный образец автоматизированного модуля пипетирования

Для обучения лабораторного персонала работе с автоматизированной установкой была разработана инструкция, полностью описывающая процесс ее запуска, подготовки, отладки и отключения.

В процессе тестовой эксплуатации программная часть роботизированного модуля стablyно осуществляла обмен данными между основными исполняющими функциональными элементами – коллaborативным роботом и программируемым логическим контроллером – и без нареканий выполняла все необходимые операции для успешного осуществления процедуры пипетирования.

За три месяца активной работы модуля не было выявлено значительного износа механических частей исполняющего инструмента, паллетов и прочих компонентов, что свидетельствует о долговечности выбранных материалов при выполнении целевой функции.

Для подналадки основных точек перемещения коллaborативного робота, проверки основных функциональных блоков и осуществления сервисных работ, был выбран интервал – 1 раз в 3 месяца.

В дальнейшем для еще большего ускорения процедуры дозирования жидкостей возможна как установка нескольких съемных емкостей или резервуаров, так и пересмотр инструмента, например, в части выбора многоканальной механической пипетки или прецизионной перистальтической помпы со сменными дозирующими иглами.

Заключение

Существование традиционных ручных методик пипетирования не отменяет необходимости разработки новых конструкций и решений, облегчающих и автоматизирующих труд лабораторных сотрудников.

Важными характеристиками разработанной роботизированной установки являются модульность, эффективность, удобство и безопасность в обращении, а также универсальность для проведения разных типов дозирующих процедур с использованием одного и того же подхода и инструмента.

Итоговая модульная конструкция состоит из следующих элементов: коллаборативного шестиосевого робота-манипулятора в качестве основной исполняющей единицы; специально разработанного исполнительного инструмента на основе одноканальной механической пипетки и паллет, в который может быть помещено до 100 микропробирок; бокса для хранения и точного позиционирования одноразовых наконечников; площадки для хранения емкости и забора жидкости из нее с автоматическим определением наполнения; стола-платформы, на котором устойчиво размещаются все компоненты.

Программный код состоит из двух основных частей – программного кода коллаборативного робота и программного кода для микроконтроллера. За счет совместной работы этих компонентов достигается плавная, быстрая и эффективная работа всей автоматизированной системы.

В ходе тестирования роботизированного модуля были выявлены и реализованы возможности оптимизации процесса пипетирования посредством перестановки основных элементов на столе-платформе, был произведен расчет среднего времени выполнения одной итерации пипетирования, которое в 2,5 раза быстрее нормированного времени для проведения данной операции, была произведена оценка точности выполнения дозирования, которая соответствует заявленной точности выбранной механической одноканальной пипетки.

В дальнейшем возможна модификация установки посредством замены инструмента на более эффективный, например, на многоканальный дозатор или прецизионную перистальтическую помпу.

Разработанный роботизированный модуль пипетирования соответствует всем заявленным требованиям: имеет малые габариты и может быть установлен во многие клинические лаборатории без дополнительной подготовки, выполнен из подходящих для размещения в лабораториях материалов, эффективно и точно выполняет свою целевую функцию – пипетирование различных жидкостей или реагентов.

Статья подготовлена при поддержке Департамента здравоохранения г. Москвы в рамках научно-исследовательской работы (№ ЕГИСУ: 125090310052-0) в соответствии с программой «Научное обеспечение столичного здравоохранения» на 2023–2025 годы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основные показатели работы ДЦЛИ. [Электронный ресурс]. URL: <https://dcli.ru/about/factors/> (дата обращения: 22.08.2025).
2. Facsc R. E. R. et al. Workforce in the Shadow of Healthcare-An Update on the Survival Status of Laboratory Medicine and Public Health // Biomedical Journal of Scientific & Technical Research. – 2024. – Т. 54. – №. 5. – Р. 46311-46317.
3. ГОСТ Р 53022.4-2008 «Технологии лабораторные клинические. Требования к качеству клинических лабораторных исследований. Часть 4. Правила разработки требований к своевременности предоставления лабораторной информации»
4. Приказ Министерства здравоохранения РФ от 25 декабря 1997 г. №380 «О состоянии и мерах по совершенствованию лабораторного обеспечения диагностики и лечения пациентов в учреждениях здравоохранения Российской Федерации»
5. Удо Э.Ф., Идову О.Дж., Бада А.Т. Влияние последовательного ручного пипетирования нескольких образцов на точность и надежность результатов теста на глюкозу // Sokoto Journal of Medical Laboratory Science. – 2024. – Т. 9. – №. 2. – С. 327-332.
6. Crawford M. L., Shuford C. M., Grant R. P. The pipetting olympics: propagating proper pipetting a priori in clinical LC-MS/MS analysis // Journal of Mass Spectrometry and Advances in the Clinical Lab. – 2023. – Т. 29. – С. 16-20.
7. Aldhabi R. et al. Prevalence and Risk Factors of Musculoskeletal Disorders Among Clinical Laboratory Technicians // Healthcare. – MDPI, 2025. – Т. 13. – №. 12. – С. 1406
8. Fikre D. et al. Prevalence of work-related musculoskeletal disorder and ergonomic risk practice among medical laboratory professionals at health facilities of eastern Ethiopia // Frontiers in Public Health. – 2024. – Т. 12. – С. 1443217.
9. Ciupe, Valentin, Erwin-Christian Lovasz, Robert Kristof, Melania-Olivia Sandu, and Carmen Sticlaru. «Design, Simulation and Experimental Validation of a Pneumatic Actuation Method for Automating Manual Pipetting Devices» Machines – 2024. – Т.13. – №. 5: – С. 389.
10. Eppendorf. Механический дозатор Eppendorf Research plus: руководство по эксплуатации. – 05.06.2024. – С. 13-19, 22-27, 53-60.

11. ГОСТ Р 60.3.4.1-2017 / ИСО 9409-1:2004 «Роботы и робототехнические устройства. Промышленные манипуляционные роботы. Механические интерфейсы. Круглые фланцы».
12. ГОСТ 25336-82 «Посуда и оборудование лабораторные стеклянные. Типы, основные параметры и размеры».
13. ГОСТ ISO 10993-1-2021 «Изделия медицинские. Оценка биологического действия медицинских изделий. Часть 1. Оценка и исследование в процессе менеджмента риска».
14. ГОСТ Р 51350-99 (МЭК 61010-1-90) «Безопасность электрических контрольно-измерительных приборов и лабораторного оборудования. Часть 1. Общие требования».
15. ГОСТ Р ИСО 15189-2015 «Лаборатории медицинские. Частные требования к качеству и компетентности».

Кюркчу Игорь Андреевич

ГБУЗ «Московский научно-практический центр лабораторных исследований Департамента здравоохранения города Москвы», г. Москва
Ведущий программист лаборатории научно-организационных технологий 115580, г. Москва, ул. Болотниковская 53 к.1
E-mail: KruckuIA@dcli.ru

Повадыр Владимир Дмитриевич

ГБУЗ «Московский научно-практический центр лабораторных исследований Департамента здравоохранения города Москвы», г. Москва
Лаборант-исследователь лаборатории научно-организационных технологий 115580, г. Москва, ул. Болотниковская 53 к.1
E-mail: PovadurVD@dcli.ru

Засорин Евгений Михайлович

ГБУЗ «Московский научно-практический центр лабораторных исследований Департамента здравоохранения города Москвы», г. Москва
Администратор отдела автоматизированных систем управления 115580, г. Москва, ул. Болотниковская 53 к.1
E-mail: ZasorinEM@dcli.ru

Коломиц Евгений Владимирович
ГБУЗ «Московский научно-практический центр лабораторных исследований Департамента здравоохранения города Москвы», г. Москва

Заведующий лабораторией научно-организационных технологий 115580, г. Москва, ул. Болотниковская 53 к.1
E-mail: KolomnecEV@dcli.ru

Комаров Андрей Григорьевич

ГБУЗ «Московский научно-практический центр лабораторных исследований Департамента здравоохранения города Москвы», г. Москва
Директор 115580, г. Москва, ул. Болотниковская 53 к.1
E-mail: KomarovEG@dcli.ru

KYURKCHU I.A., POVADYR V.D., ZASORIN E.M., KOLOMIETS E.V., KOMAROV A.G.

DEVELOPMENT OF A ROBOTIC PIPETTING MODULE

Abstract. The growing number of patients and research performed in clinical laboratories requires the introduction of fundamentally new modular automation technologies. One of the most labor-intensive processes traditionally performed manually is pipetting, which not only takes up a significant amount of laboratory staff time, but also has a negative impact on their health. The aim of the work is to develop a universal robotic pipetting module, which makes it possible to increase the efficiency, reproducibility and safety of this procedure in a clinical laboratory. A robotic pipetting module has been developed and created that can be installed in clinical laboratories without significant infrastructure changes. The tests performed showed the stability of the system: the average pipetting time of one micro-sample was 7 seconds, which is 2.5 times faster than the manual procedure, and the dosing accuracy corresponds to the claimed accuracy of the mechanical pipette used. The design provides ease of maintenance, modularity and the possibility of further modernization.

Keywords: collaborative robot, pipetting; automation, routine processes, healthcare, clinical laboratory.

BIBLIOGRAPHY

1. The main performance indicators of the DCL. [electronic resource]. URL: <https://dcli.ru/about/factors/> / (date of reference: 08/22/2025).
2. Faesc R. E. R. et al. Workforce in the Shadow of Healthcare-An Update on the Survival Status of Laboratory Medicine and Public Health // Biomedical Journal of Scientific & Technical Research. – 2024. – T. 54. – №. 5. – P. 46311-46317.
3. GOST R 53022.4-2008 «Laboratory clinical technologies. Requirements for the quality of clinical laboratory research. Part 4. Rules for the development of requirements for the timely provision of laboratory information»

4. Order of the Ministry of Health of the Russian Federation No. 380 dated December 25, 1997 «On the status and measures to improve laboratory support for the diagnosis and treatment of patients in healthcare institutions of the Russian Federation»
5. Udo E.F., Idovu O.J., Bada A.T. The effect of sequential manual pipetting of several samples on the accuracy and reliability of glucose test results // Sokoto Journal of Medical Laboratory Science. – 2024. – Vol. 9. – No. 2. – pp. 327-332.
6. Crawford M. L., Shuford C. M., Grant R. P. The pipetting olympics: propagating proper pipetting a priori in clinical LC-MS/MS analysis // Journal of Mass Spectrometry and Advances in the Clinical Lab. – 2023. – Vol. 29. – pp. 16-20.
7. Aldhabi R. et al. Prevention and Risk Factors of Musculoskeletal Disorders Among Clinical Laboratory Technicians // Healthcare. – MDPI, 2025. – Vol. 13. – no. 12. – P. 1406
8. Fikre D. et al. The importance of work-related muscular skeletal disorder and ergonomic risk practice among medical laboratory professionals at health facilities of eastern Ethiopia // Frontiers in Public Health. – 2024. – Vol. 12. – pp. 1443217.
9. Ciupe, Valentin, Erwin-Christian Lovasz, Robert Kristof, Melania-Olivia Sandu, and Carmen Sticlaru. "Design, Simulation and Experimental Validation of a Pneumatic Actuation Method for Automating Manual Pipetting Devices" Machines – 2024. – Vol. 13. – No. 5: – p. 389.
10. Eppendorf. Eppendorf Research plus mechanical dispenser: user manual. – 06/05/2024. – pp. 13-19, 22-27, 53-60.
11. GOST R 60.3.4.1-2017 / ISO 9409-1:2004 «Robots and robotic devices. Industrial manipulation robots. Mechanical interfaces. Round flanges».
12. GOST 25336-82 «Laboratory glassware and equipment. Types, basic parameters and dimensions».
13. GOST ISO 10993-1-2021 «Medical devices. Assessment of the biological effect of medical products. Part 1. Assessment and research in the risk management process».
14. GOST R 51350-99 (IEC 61010-1-90) «Safety of electrical instrumentation and laboratory equipment. Part 1. General requirements».
15. GOST R ISO 15189-2015 «Medical laboratories. Specific requirements for quality and competence».

Kyurkchu Igor Andreevich

GBUZ "Moscow Scientific and Practical Laboratory Research Center of the Department of Health of the city of Moscow", Moscow
The leading programmer of laboratory of scientific and organizational technologies
115580, Moscow, Bolotnikovskaya
St. 53 K.1
E-mail: KruckuiA@dcli.ru

Povadyr Vladimir Dmitrievich

GBUZ "Moscow Scientific and Practical Laboratory Research Center of the Department of Health of the city of Moscow", Moscow
Laboratory assistant Researcher at the Laboratory of Scientific and Organizational Technologies
115580, Moscow, Bolotnikovskaya
St. 53 K.1
E-mail: PovadurVD@dcli.ru

Zasorin Evgeny Mikhailovich

GBUZ "Moscow Scientific and Practical Laboratory Research Center of the Department of Health of the city of Moscow", Moscow
The administrator of the department of automated control systems
115580, Moscow, Bolotnikovskaya
St. 53 K.1
E-mail: ZasorinEM@dcli.ru

Kolomiets Evgeny Vladimirovich

GBUZ "Moscow Scientific and Practical Laboratory Research Center of the Department of Health of the city of Moscow", Moscow
Head of the Laboratory of Scientific and Organizational Technologies
115580, Moscow, Bolotnikovskaya
St. 53 K.1
E-mail: KolomnecEV@dcli.ru

Komarov Andrey Grigorevich

GBUZ "Moscow Scientific and Practical Laboratory Research Center of the Department of Health of the city of Moscow", Moscow
Director
115580, Moscow, Bolotnikovskaya
St. 53 K.1
E-mail: KomarovEG @dcli.ru

ПРИБОРЫ, БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621-822-574

DOI: 10.33979/2073-7408-2025-373-5-99-109

КУРЗАКОВ А.С.

ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ АДАПТИВНОГО ГАЗОСТАТИЧЕСКОГО ПОДШИПНИКА ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Аннотация. В данной статье представлена конструкция и анализ адаптивного газостатического подшипника с плавающим кольцевым регулятором, предназначенного для использования в несущей системе измерительного и диагностического оборудования и обеспечивающего повышение точности и управляемости в различных приложениях. Особенностью предлагаемой конструкции является возможность динамической настройки характеристик опоры, таких как жёсткость и демпфирование, в процессе работы. Разработана математическая модель, основанная на дискретизации газовых слоёв, и специализированное программное обеспечение для расчёта статических нагрузочных характеристик подшипника. Описаны два алгоритма расчёта, оптимизированные для различных режимов работы, включая режимы положительной и отрицательной податливости. Проведён анализ влияния управляющего давления и эксцентрикитетов элементов на несущую способность и устойчивость подшипника. Выявлены условия, при которых возможно достижение максимальной несущей способности, а также случаи проявления отрицательной податливости и нестабильности положения цапфы. Результаты исследования демонстрируют потенциал активного управления газостатическими опорами для расширения их применения в прецизионном оборудовании и требуют дальнейших исследований в области динамических характеристик и алгоритмов управления. Представленная работа может быть полезна для разработчиков прецизионных приборов, использующих газостатические опоры, и исследователей в области гидрогазодинамики.

Ключевые слова: адаптивный газостатический подшипник, плавающий кольцевой регулятор, демпфирование, отрицательная податливость, управляющее давление.

Введение

Первые упоминания об использовании газа как смазочного материала относятся к середине XIX века (Хирн, 1854 [1]). Кингсбери [2], изобретатель сегментного гидродинамического подшипника, также экспериментировал с газовой смазкой. Основы теории гидродинамической смазки были заложены Петровым [3] (1883) и Рейнольдсом [4] (1886), сформулировавшим уравнение течения вязкой жидкости в тонком слое и исследовавшим истечение газа [5]. Теоретический анализ газовых подшипников начался с работы Гаррисона [6] (1913). Впоследствии было запатентовано множество конструкций газостатических опор [7-11]. В СССР, с 1939 года, Шейнберг и коллеги [12; 13] проводили исследования опор с газовой смазкой, разрабатывая теорию и примеры применения в станках [14]. Исследования продолжили научные коллективы под руководством Пинегина, Пешти, Сипенкова и др., изучая газодинамические подшипники и динамику роторов [15-19]. Развитие теории и практики привело к созданию рекомендаций по проектированию, например, методики проектирования радиальных газостатических опор с ограничителями расхода [20].

Активное управление газостатическими узлами представляется перспективным для улучшения их характеристик. Breńkacz et al. [21] рассматривают различные типы опор с активной компенсацией перемещений, в том числе газодинамические (лепестковые с пьезоэлектрическими компенсаторами) и газостатические (с дросселями, регулируемыми пьезоэлементами). Raparelli et al. [22] выделили три подхода к активной компенсации перемещений: ограничение потока, геометрическая компенсация и гибридный метод. Активная компенсация позволяет создавать газостатические узлы с улучшенными динамическими характеристиками, нагрузочной способностью и сниженной податливостью.

Газостатические опоры обладают уникальным сочетанием свойств, что определяет их применение в измерительном и диагностическом оборудовании. Ключевое преимущество - отсутствие трения покоя и механического контакта, исключающее вибрации. По сравнению с опорами качения, газостатические конструкции демонстрируют повышенную жёсткость из-за большей площади опорных поверхностей. Несмотря на ограничения (относительно низкая несущая способность и необходимость компрессорного оборудования), газостатические опоры широко применяются в прецизионных системах. Они использовались в гироскопах,

кругломерах, измерительных столах, стенах для измерения шага винта, динамометрах, установках для испытания подшипников и вибрационного оборудования [23]. Также описано применение в приборах для измерения вибрации подшипников, момента трения, толщины смазочного слоя, стенах для испытания материалов и оценки качества шпинделей [16]. В современных системах газостатические опоры используются в эталонных шпинделях, координатно-измерительных машинах, опорах телескопов и антенн [24; 25].

Основная часть

Разработанный автором адаптивный газостатический подшипник [26-29] представлен на рисунке 1. Он содержит сборную опорную втулку, корпус и плавающий кольцевой регулятор. Управляющий зазор (щелевой дроссель) 1 подаёт воздух через канал 2 и кольцевые полости 3 в несущий слой 5 через радиальный зазор 4. Ступенчатый подвес (щелевые дроссели 6 и 7) поддерживает кольцевой регулятор. Под действием нагрузки, смещающей цапфу, происходит перераспределение давлений в щелевых дросселях. Уменьшение зазора в нижней части повышает давление в зазоре 1, вызывая смещение кольцевого регулятора вниз, что увеличивает зазор 1 и подачу воздуха в несущий слой. В верхней части происходят обратные процессы.

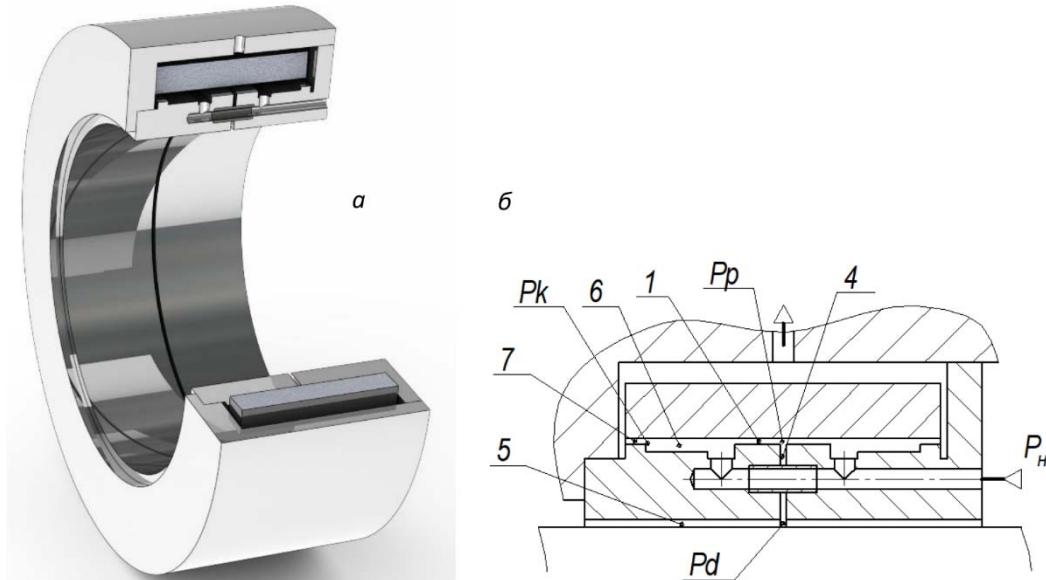


Рисунок 1 – Газостатический подшипник:
а – изображение с вырезом четверти; б – разрез

Дросселирование воздуха из зазора 7 в полость между регулятором и корпусом позволяет регулировать жёсткость подвеса кольца и, следовательно, влиять на активность регулятора. Динамическая настройка характеристик опоры – значительное преимущество предложенной конструкции, поскольку традиционно параметры газостатических опор фиксированы.

Модель движения газа в газостатическом подшипнике формируется на основе уравнений Навье – Стокса, усреднённых по Рейнольдсу [17; 30-32]. Для упрощения задачи вводятся следующие допущения, оправданные физическими и геометрическими особенностями конструкции. Толщина газового зазора значительно меньше других размеров (на три порядка), поэтому разность площадей поверхностей слоя можно не учитывать. Силы инерции в потоке газа исключаются [16], что позволяет рассматривать течение как ламинарное, даже при значениях числа Рейнольдса, достигающих 4000–10000. Из-за малой толщины слоя и больших сдвиговых напряжений переход к турбулентности не происходит. Процесс течения газа предполагается изотермическим, что делает динамическую вязкость постоянной. Локальные падения температуры на узких участках выхода потока (как показывают исследования, на величину до 3 К) несущественно влияют на распределение давления. Влияние собственного веса газа в конструкции пренебрежимо мало из-за низкой плотности среды. С учётом всех упомянутых допущений уравнение Рейнольдса в векторной форме [17]:

$$\operatorname{div}(-h^3 p \cdot \operatorname{grad}(p) + \Lambda U \cdot h \cdot p) + \sigma \frac{\partial(h \cdot p)}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

где h – толщина зазора;

p – давление;

U – скорость потока;

t – время;

Λ – число сжимаемости [19];

σ – число сдавливания.

При исследовании статических характеристик исключаются слагаемые, зависящие от времени. В цилиндрических координатах уравнение принимает вид [33]:

$$h^3 \left(\frac{\partial^2 p^2}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial}{\partial \varphi \cdot r_0} \left(h^3 \frac{\partial p^2}{\partial \varphi \cdot r_0} \right) = 0, \quad (2)$$

где z – осевая координата;

$\varphi \in [0; \pi]$ – угловая координата;

r_0 – радиус цапфы.

Для упрощения задачи вводятся безразмерные переменные:

$$H = \frac{h}{h_0}; \quad P = \frac{p}{p_A}; \quad Z = \frac{z}{l}, \quad (3)$$

где H – безразмерный зазор;

h_0 – номинальный зазор;

P – безразмерное давление;

Z – безразмерная осевая координата;

l – длина подшипника в осевом направлении;

$L = l/r_0$ – безразмерное удлинение.

С учётом этих обозначений уравнение (2) преобразуется в безразмерный вид:

$$H^3 \frac{\partial^2 P^2}{\partial Z^2} + L^2 \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(H^3 \frac{\partial P^2}{\partial \varphi} \right) = 0. \quad (4)$$

Методики решения уравнения (4), предложенные в работах [33; 34] позволяют вычислять распределение давления и несущую способность подшипника.

Если безразмерное удлинение подшипника составляет 0.7 и менее, окружным перетоком газа можно пренебречь. В этом случае уравнение (4) сводится к одномерному виду:

$$\frac{\partial^2 P^2}{\partial Z^2} = 0. \quad (5)$$

Его решением является линейная функция:

$$P^2 = C_1 Z + C_2. \quad (6)$$

При давлениях P_1 на входе и P_2 на выходе участка газового слоя зависимость (6) будет иметь вид:

$$P^2 = P_1^2 - (P_1^2 - P_2^2) \cdot \frac{Z}{L}. \quad (7)$$

Давления на стыках участков с различающимися параметрами вычисляются на основе уравнения баланса расходов:

$$P_{\text{int}}^2 = \frac{\frac{H_1^3}{L_1} P_{\text{in}}^2 + \frac{H_2^3}{L_2} P_{\text{out}}^2}{\frac{H_1^3}{L_1} + \frac{H_2^3}{L_2}}, \quad (8)$$

где P_{in} – давление на входе;

P_{out} – давление на выходе;

H_1, L_1, H_2, L_2 – зазоры и длины участков.

Для рассматриваемой конструкции (рисунок 1) на основании (8) давления в узловых точках основного тракта нагнетания определяются по формулам:

$$P_p^2 = \frac{2b_1 P_{in}^2 + b_4 P_d^2}{2b_1 + b_4}; P_d^2 = \frac{b_4 P_p^2 + 2b_5 P_a^2}{b_4 + 2b_5} \quad (9)$$

где $b_i = H_i^3 / L_i$ – отношение куба зазора к длине участка. Из этих выражений получаем:

$$P_p^2 = \frac{\frac{2b_1}{2b_1 + b_4} P_{in}^2 + \frac{2b_4 b_5}{(2b_1 + b_4)(b_4 + 2b_5)} P_a^2}{1 - \frac{b_4^2}{(2b_1 + b_4)(b_4 + 2b_5)}}. \quad (10)$$

Умножив результат на $(2b_1 + b_4)(b_4 + 2b_5)$, получаем окончательное выражение для давления на стыке участков 1 и 4:

$$P_p^2 = \frac{2b_1(b_4 + 2b_5)P_{in}^2 + 2b_4 b_5 P_a^2}{(2b_1 + b_4)(b_4 + 2b_5) - b_4^2}. \quad (11)$$

Интегрирование найденных функций давления по осевой и радиальной координатам позволяет вычислить реакции газового слоя, действующие на цапфу и кольцо-регулятор.

Особенностью исследуемой конструкции является наличие двух ограничивающих участков (4 и 7 на рисунке 1), определяющих максимальное смещение кольцевого регулятора. Для корректного определения смещения при неравенстве зазоров необходимо исключить отрицательные значения. Введём понятие «ограничивающего зазора» (H_{m0}), равного минимальному из зазоров 4 и 7 в центральном положении кольца: $H_{m0} = \min(H_1, H_7)$. Эксцентриситет кольца (E_k) задаётся в диапазоне $[-1; 1]$. Предполагается отсутствие перекоса кольца из-за симметрии газовых слоёв и давлений. Исходя из этого, зависимость ограничивающего зазора от угла и эксцентриситета кольца выражается как

$$H_m(E_k, \varphi) = H_{m0}(1 - E_k \cos \varphi) \quad (12)$$

Для участка 6, имеющего увеличенную толщину газового зазора, её значение можно выразить в виде:

$$H_6(E_k, \varphi) = H_m(E_k, \varphi) + (H_6 - H_{m0}). \quad (13)$$

Так как в формуле (13) присутствует неизменное слагаемое, угловые производные для зазоров H_m и H_6 будут совпадать:

$$\frac{\partial H_m}{\partial \varphi} = \frac{\partial H_6}{\partial \varphi} = H_{m0} E_k \sin \varphi. \quad (14)$$

Производная куба зазора H_m :

$$\frac{\partial H_m^3}{\partial \varphi} = 3H_m^2 \cdot \frac{\partial H_m}{\partial \varphi} = 3H_m^2 \cdot H_{m0} E_k \sin \varphi. \quad (15)$$

Аналогично, для куба зазора H_6 с учётом (14):

$$\frac{\partial H_6^3}{\partial \varphi} = 3H_6^2 \frac{\partial H_m}{\partial \varphi}. \quad (16)$$

В результате можно записать обобщённые зависимости, применимые для расчёта величин зазоров и их производных, необходимых при определении коэффициентов при производных в уравнении (4):

$$\begin{aligned} H_i &= H_{m0}(1 - E_k \cos \varphi) + H_\Delta \\ \frac{\partial H_i^3}{\partial \varphi} &= 3H_i^2 H_{m0} E_k \sin \varphi, \end{aligned} \quad (17)$$

где $i = 1, 6, 7$ – номер участка, прилегающего к кольцу;

$H_\Delta = (H_{i0} - H_{m0})$ – разность зазора на участке i и соответствующего ограничивающего зазора.

В данной работе моделирование подшипника основано на дискретизации газовых слоёв на плоские и цилиндрические элементы. Реакция каждого слоя определялась суммированием проекций сил газостатического давления на вертикальную ось. Аналитическая модель оперирует абсолютными значениями давлений. Для корректных результатов необходимо использовать манометрическое давление (расчётное за вычетом атмосферного), что

принципиально для разомкнутых опор или несимметричных конструкций. Расчётная модель формирует поля давлений в безразмерном виде. Для сопоставления с данными машинного эксперимента безразмерная реакция газовых слоёв (W) умножалась на масштаб сил (w_0). Учитывая, что масштабом безразмерных линейных величин является радиус цапфы (r_0), масштабом давлений – атмосферное давление ($p_a = 0.1$ МПа), и что в аналитической модели рассматривается половина опоры, размерное значение реакции (w) определялось из выражения

$$w = W \cdot w_0 = W \cdot 2r_0^2 p_a \quad (18)$$

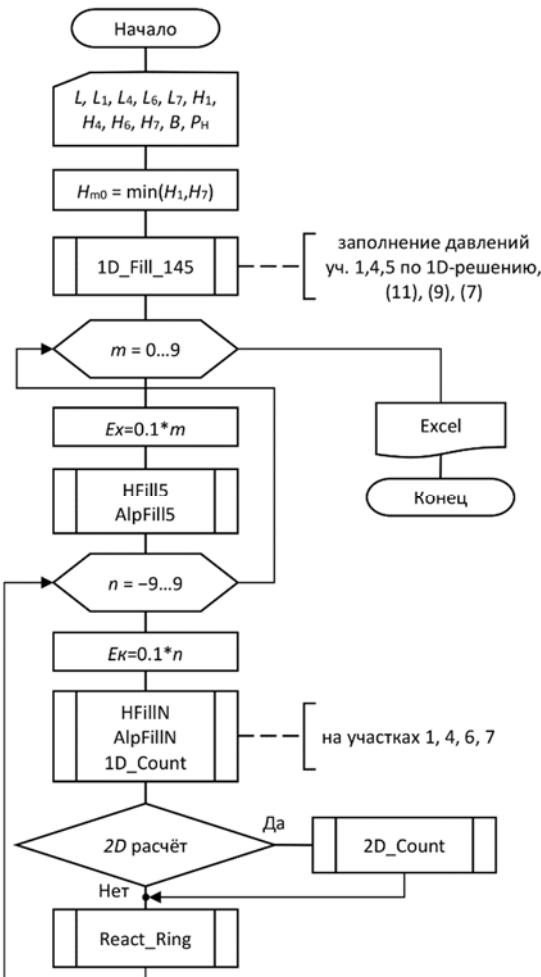


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма расчёта реакции, действующей на кольцо

Для исследования статических характеристик разработана программа расчёта полей давлений и реакций газовых слоёв, определяющая равновесное положение регулятора и нагрузочные характеристики опоры (Delphi). Пример алгоритма подготовки данных для построения трёхмерного графика зависимости реакции газовых слоёв от эксцентрикситета цапфы и кольца представлен на рисунке 2. В зависимости от метода решения (конечно-разностный или упрощённый одномерный расчёт), программа выполняет циклический пересчёт до заданной точности (2D_Count) либо однократный расчёт. Алгоритм начинается с внешнего цикла, варьирующего параметр m для эксцентрикситета цапфы (Ex). Внутренний цикл варьирует эксцентрикситет кольца (Ek). При каждом изменении Ek пересчитываются коэффициенты при производных в уравнении Рейнольдса для газовых слоёв, контактирующих с кольцом (1, 6, 7). Пересчёт этих коэффициентов для несущего слоя (5) производится при изменении Ex (HFILL5, AlpFill5). Для каждой комбинации Ex и Ek процедурой React_Ring определяется суммарная реакция сил на кольцо. Расчёт давлений на основе одномерного решения (1D_Fill_145) необходим для инициализации конечно-разностной схемы. Результаты могут быть визуализированы, но для анализа предпочтителен вывод данных в виде таблицы.

На основе математической модели рассчитаны нагрузочные характеристики подшипника. Использовалась упрощённая одномерная модель течения рабочей среды,

допустимая, поскольку окружные перетоки газа оказывают ограниченное влияние на реакции несущих слоёв.

Для расчёта применялись два алгоритма. Первый алгоритм варьировал эксцентрикитет цапфы (Ex), а для каждого Ex изменялся эксцентрикитет кольца-регулятора (Ek) и определялась реакция сил на кольцо. При пересечении реакцией кольца нулевого значения, точка определялась интерполяцией и вычислялось значение реакции несущего слоя. Этот алгоритм надёжен при значительных Ex .

Однако в адаптивном режиме, когда малому Ex соответствуют несколько значений реакции несущего слоя, первый алгоритм даёт только часть точек. Для участков малой и отрицательной податливости использовался второй алгоритм, варьирующий Ek . При каждом Ek изменялся Ex , и вычислялась реакция на кольце. Уточнённое значение Ex определялось интерполяцией.

Итоговые нагрузочные характеристики пассивного и адаптивного режимов, полученные комбинированием результатов обоих алгоритмов, представлены на рисунке 3. Эксцентрикитеты цапфы и кольца представлены в безразмерном виде. Максимальное смещение цапфы составляет 20 мкм, кольца – 14 мкм.

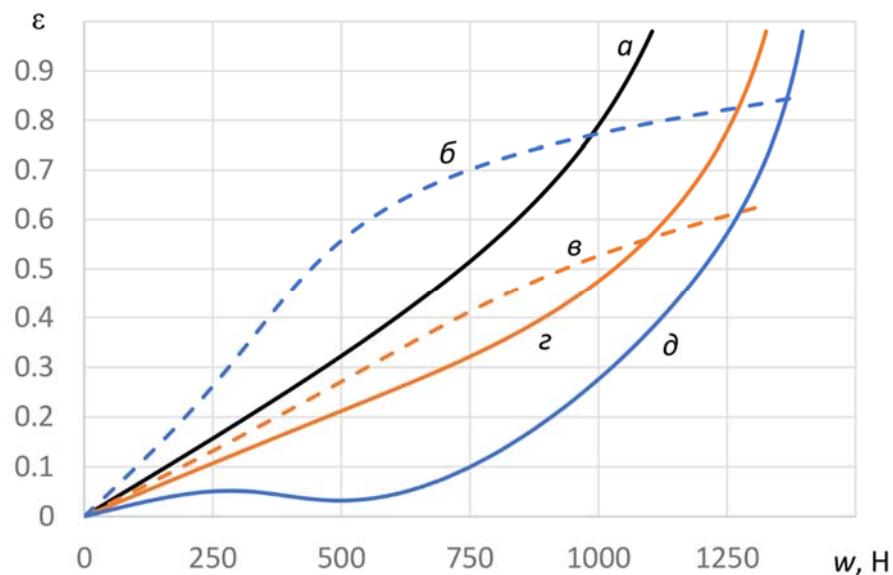


Рисунок 3 – Нагрузочные характеристики при пассивном (а) и адаптивном режиме:
б, в – кольцо; г, д – цапфа; в, г – $P_y = 0.2 \text{ МПа}$; б, д – $P_y = 0.27 \text{ МПа}$

Основным фактором, влияющим на характер работы конструкции, является управляющее давление P_y . Как следует из рисунка 3, увеличение P_y приводит к росту активности регулятора и снижению податливости опоры. Исследования показывают, что при дальнейшем увеличении управляющего давления нагрузочные кривые располагаются ниже оси абсцисс. Образование точек минимума на этих кривых обусловлено специфическим характером зависимости реакции кольца от его эксцентрикитета. Данная зависимость, изображённая кривой β на рисунке 5, построена для значения эксцентрикитета цапфы $Ex \approx 0.33$. Видно, что кривая β касается оси абсцисс в правой части графика, что соответствует нижней точке упомянутой нагрузочной характеристики. При меньших значениях Ex кривая β (рисунок 5) располагается выше и не пересекает ось абсцисс, что свидетельствует об отсутствии равновесного положения кольца. В результате при увеличении нагрузки цапфа, после достижения точки экстремума, будет смещаться в положительном направлении, совпадающем с направлением действия нагрузки. При управляющем давлении равном 0.34 МПа проявляется существенная отрицательная податливость, сопровождаемая участком, где положение цапфы становится неопределенным. В частности, при несущей способности около 13 Н цапфа может смещаться на величину от -2 до -3.5 мкм, при этом реакция остается почти постоянной. Это приводит к тому, что положение кольца-регулятора также становится непредсказуемым (см. рисунок 4), и, как следствие, регулятор теряет свою стабилизирующую функцию.

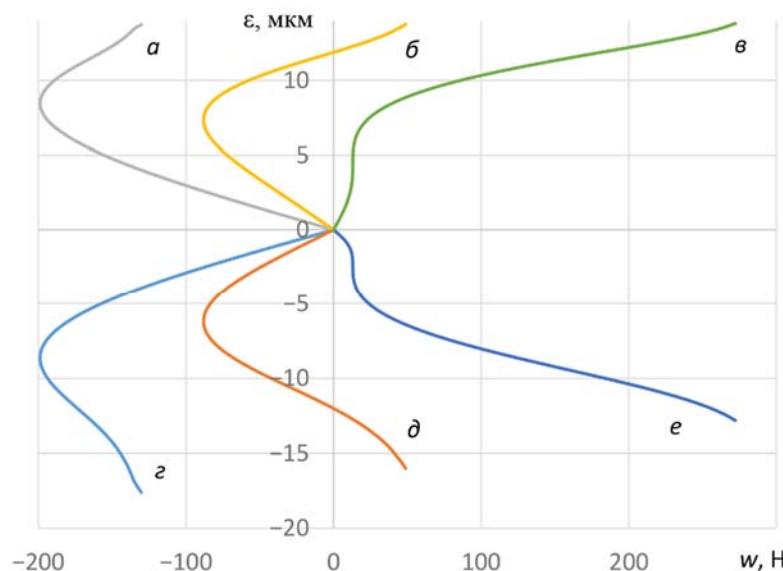


Рисунок 4 – Нагрузочные характеристики при чрезмерном увеличении активности регулятора
 a, b, v – кольцо; g, d, e – цапфа; a, g – $P_y = 0.38 \text{ МПа}$; b, d – $P_y = 0.36 \text{ МПа}$; v, e – $P_y = 0.34 \text{ МПа}$

Представленные графики демонстрируют, что кольцо во всех случаях достигает своего крайнего положения, а кривая реакции на цапфе приближается к кривой, соответствующей максимальной несущей способности.

На рисунке 5 проиллюстрированы точки равновесного положения кольца в различных условиях. В частности, показаны зависимости реакции кольца-регулятора от его эксцентриситета при различных значениях управляющего давления. Например, при $P_y = 0.32 \text{ МПа}$ и эксцентриситете цапфы $E = -0.2$, кольцо находится в равновесии при $E_k \approx 0.56$. Однако, при $P_y = 0.36 \text{ МПа}$ и том же E , равновесие достигается при $E_k \approx 0.36$. Такой меньший эксцентриситет приводит к снижению реакции несущего слоя, что в конечном итоге уменьшает несущую способность подшипника.

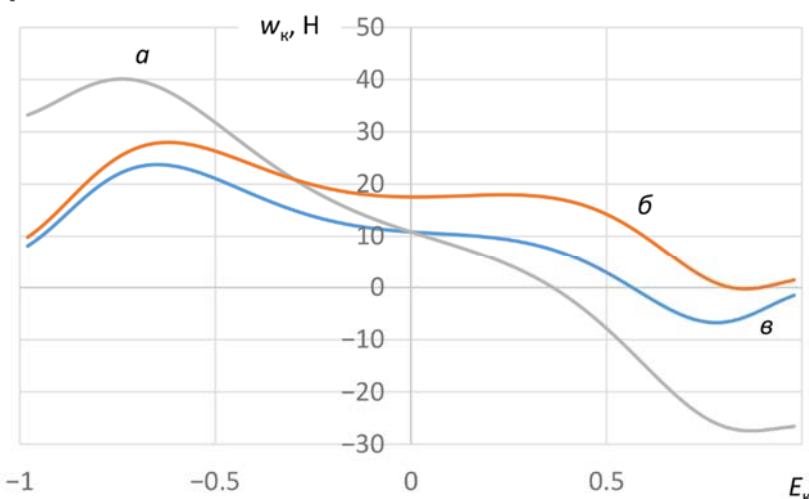


Рисунок 5 – Зависимость реакции на кольце от его эксцентриситета
 b, v – $P_y = 0.32 \text{ МПа}$; a – $P_y = 0.36 \text{ МПа}$; a, v – $E = -0.2$; b – $E \approx -0.33$

Анализ статических характеристик, представленных на рисунках 3 и 4, выявляет разницу в величине реакции несущего слоя в различных рабочих режимах. В режиме положительной податливости реакция увеличивается до значений, превышающих 1200 Н, в то время как при отрицательной податливости или избыточной активности регулятора она находится в диапазоне 200–700 Н. Причины этого расхождения можно увидеть на графиках рисунка 6, где показаны зависимости реакции несущего слоя от эксцентриситета цапфы. Важно отметить, что при построении этих графиков использовались нулевые и положительные значения эксцентриситета кольца-регулятора (E_k), что соответствует условиям, при которых были получены вышеупомянутые нагрузочные характеристики.

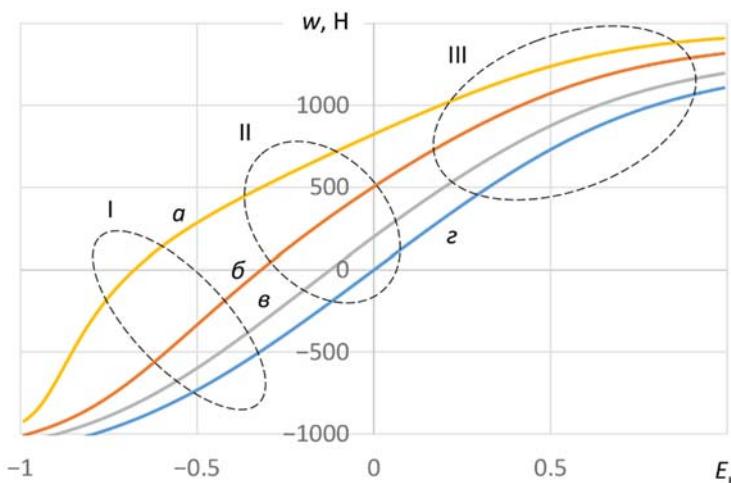


Рисунок 6 – Зависимость реакции несущего слоя от эксцентрикситета цапфы
а – $E_k = 0.9$; б – $E_k = 0.6$; в – $E_k = 0.3$; г – $E_k = 0$

Анализ этих графиков показывает, что максимальная несущая способность подшипника достигается только при относительно больших положительных эксцентрикситетах цапфы (зона I на рисунке 6). В режиме отрицательной податливости (зона II) реакция ограничена меньшими значениями, даже при максимальных эксцентрикситетах кольца (кривая а). Кроме того, рисунок объясняет, как формируется отрицательная реакция несущего слоя (зона III), что наблюдается на графиках рисунка 4: несмотря на положительный эксцентрикситет кольца, реакция формируется не в зоне II, а в зоне III.

Заключение

Активное управление газостатическими узлами является перспективным направлением для улучшения их характеристик, таких как динамические параметры, нагрузочная способность и податливость.

Предложена конструкция адаптивного газостатического подшипника с плавающим кольцевым регулятором. Эта конструкция позволяет динамически настраивать характеристики опоры, в отличие от традиционных газостатических опор с фиксированными параметрами.

Разработана математическая модель и программа для расчёта характеристик предложенного подшипника. Модель основана на дискретизации газовых слоёв и позволяет определять равновесное положение регулятора и нагрузочные характеристики.

Выявлены особенности работы подшипника в различных режимах, включая режимы малой и отрицательной податливости. Показано, что для достижения максимальной несущей способности необходимо обеспечивать относительно большие положительные эксцентрикситеты цапфы.

Описаны два алгоритма для расчёта нагрузочных характеристик, каждый из которых эффективен в определённых диапазонах эксцентрикситетов. Комбинирование результатов, полученных с использованием обоих алгоритмов, позволяет получить полные нагрузочные характеристики в различных режимах работы.

Показано, что при некоторых значениях управляющего давления может наблюдаться отрицательная податливость, сопровождаемая неопределенностью положения цапфы. Это связано с тем, что в рассмотренных случаях регулятор может не выполнять стабилизирующую функцию.

В целом, исследование демонстрирует потенциал активного управления газостатическими опорами для улучшения их характеристик и расширения области применения в прецизионных системах. Однако необходимо учитывать особенности работы подшипника в различных режимах и выбирать соответствующие эксплуатационные параметры для достижения оптимальных характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hirn, A. Study of principal phenomena shown by friction / A. Hirn // Bull soc. induster. Millhouse. - 1854. - Vol. XXVI. - P. 188–277.

2. Kingsbury, A. Experiments with air lubricated bearing / A. Kingsbury // Am. Soc. Nav. Eng. - 1897. - Vol. 9. - P. 267–292.
3. Петров, Н. П. Трение в машинах и влияние на него смазывающей жидкости / Н.П. Петров. - Санкт-Петербург : Тип. А. С. Суворина, 1883. - 210 с.
4. Reynolds, O. On the theory of lubrication and its application to Mr. Beauchamp towers experiments, including an experimental determination of the viscosity of olive oil / O. Reynolds // Philosophical transactions of the Royal Society of London. - 1886. - Iss. 177. - P. 157–234.
5. Reynolds, O. XXVIII. On the flow of gases / O. Reynolds // The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. - 1886. - Vol. 21, Iss. 130. - P. 185–199. <https://doi.org/10.1080/14786448608627834>
6. Harrison, W. J. The Hydrodynamical Theory of Lubrication with Special Reference to Air as a Lubricant / W.J. Harrison // Trans. Cambridge Philos. Soc. - 1913. - Vol. 22. - P. 39–54.
7. Патент № US2086896A USA, МПК G01C19/38, Y10T74/1239, Y10T74/1282. Air supported gyroscope : № US734619A : заявл. 1934.07.11 : опубл. 1937.07.13 / L.F. Carter ; Sperry Gyroscope Co Inc. - 8 p.
8. Патент № US2683635A USA, МПК F16C32/0618, F16C32/0622, F16C32/067, F16C32/0696. Air bearing : № US126757A : заявл. 1949.11.12 : опубл. 1954.07.13 / M.W. Roy ; Filed by Individual. - 12 p.
9. Патент № US2683636A USA, МПК F16C32/0651, Y10S384/902, Y10T29/49639, Y10T74/12. Air bearing : № US126758A : заявл. 1949.11.12 : опубл. 1971.07.13 / M.W. Roy ; Filed by Individual. - 5 p.
10. Патент № SU236138A1 СССР, МПК F16C 17/02, F16C 32/06. Газостатический радиальный подшипник с внешним наддувом : № 1120841/25-27 : заявл. 1966.12.22 : опубл. 1969.01.24 / В.С. Васильев. - 2 с.
11. Патент № SU184565A1 СССР, МПК F16C 33/04, F16C 32/06. Газостатический радиально-упорный подшипник скольжения : № 909193/25-27 : заявл. 1964.07.04 : опубл. 1966.07.21 / А.М. Харитонов. - 2 с.
12. Шейнберг, С. А. Экспериментальное исследование аэродинамических опор скольжения / С.А. Шейнберг // Трение и износ в машинах. - 1950. - № 6.
13. Шейнберг, С. А. Газовая смазка подшипников скольжения / С.А. Шейнберг // Трение и износ в машинах. - 1953. - № 8.
14. Шейнберг, С. А. Опоры скольжения с газовой смазкой / С.А. Шейнберг, В.П. Жедь, М.Д. Шишеев. - Москва : Машиностроение, 1979. - 336 с.
15. Пинегин, С. В. Опоры с газовой смазкой в турбомашинах ограниченной мощности / С.В. Пинегин, Г.А. Поспелов, Ю.В. Пешти. - Москва : Наука, 1977. - 149 с.
16. Пинегин, С. В. Статические и динамические характеристики газостатических опор / С.В. Пинегин, Ю.Б. Табачников, И.Е. Сипенков. - Москва : Наука, 1982. - 265 с.
17. Пинегин, С. В. Прецизионные опоры качения и опоры с газовой смазкой / С.В. Пинегин, А.В. Орлов, Ю.Б. Табачников. - Москва : Машиностроение, 1984. - 215 с.
18. Пешти, Ю. В. Газовая смазка / Ю.В. Пешти. - Москва : Изд-во МГТУ, 1993. - 381 с. - ISBN 5-7038-0942-8.
19. Сипенков, И. Е. Прецизионные газовые подшипники / И.Е. Сипенков, А.Ю. Филиппов. - Санкт-Петербург : Электроприбор, 2007. - 503 с. - ISBN 5-900780-63-5 (В пер.).
20. Афонин, В. В. Руководящий технический материал 108.129.101-76. Расчет радиальных газостатических подшипников турбомашин атомной энергетики / В.В. Афонин, Н.Н. Сидора, В.А. Семенов [и др.]. - Ленинград : НПО ЦКТИ, 1976. - 86 с.
21. Breńkacz, Ł. Research and applications of active bearings: A state-of-the-art review / Ł. Breńkacz, Ł. Witanowski, M. Drosińska-Komor [et al.] // Mechanical Systems and Signal Processing. - 2021. - Vol. 151. - P. 107423. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107423>
22. Raparelli, T. Aerostatic thrust bearings active compensation: Critical review / T. Raparelli, V. Viktorov, F. Colombo [et al.] // Precision Engineering. - 2016. - 44, Vol. 44. - P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2015.11.002>
23. Грэссем, Н. С. Подшипники с газовой смазкой / Н.С. Грэссем, Д.У. Пауэлл. - Москва : Мир, 1966. - 423 с.
24. Al-Bender, F. Air bearings: theory, design and applications / F. Al-Bender. - Hoboken : John Wiley & Sons, 2021. - 592 p. - ISBN 1118511492.
25. Thomas, A. S. Design and status of the Spectroscopic Survey Telescope. In Proceedings of 1994 Symposium on Astronomical Telescopes and Instrumentation for the 21st Century, Kailua, Kona, HI, United States, 1 June 1994. - P. 565–572. <https://doi.org/10.1117/12.176224>
26. Курзаков, А. С. Исследование работоспособности технологической шпиндельной опоры / А.С. Курзаков // Станки и инструмент. - 2013. - № 8. - С. 38–40.
27. Курзаков, А. С. Расчёт параметров адаптивной газостатической шпиндельной опоры / А.С. Курзаков // Вестник машиностроения. - 2013. - № 4. - С. 27–30.
28. Курзаков, А. С. Исследование управляемой газостатической шпиндельной опоры / А.С. Курзаков // Технология машиностроения. - 2013. - № 12. - С. 25–27.
29. Курзаков, А. С. Бесконтактные адаптивные шпиндельные опоры для прецизионных и высокоскоростных металлорежущих станков / А.С. Курзаков, С.Н. Шатохин // Технологическое обеспечение машиностроительных производств : сб. науч. тр. I международной заочной научно-технической конференции. - 2014. - № 1. - С. 310–314.
30. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа : Учеб. для студентов вузов / Л.Г. Лойцянский. - Москва : Дрофа, 2003. - 840 с. - ISBN 5-7107-6327-6 (в пер.).
31. Андерсон, Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. В 2 томах. Т. 1 / Д. Андерсон, Д. Таннхилл, Р. Плетчер. - Москва : Мир, 1990. - 385 с. - ISBN 5-03-001926-X.
32. Камерон, А. Теория смазки в инженерном деле: Пер. с англ / А. Камерон, В.А. Бородин. - Москва : Машгиз, 1962. - 296 с.

33. Курзаков, А. С. Разработка радиальных аэростатических опор с плавающими регуляторами : специальность 05.02.02 "Машиноведение, системы приводов и детали машин" : диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук / Курзаков Андрей Сергеевич ; Красноярский государственный технический университет. - Красноярск, 2002. - 211 с.

34. Курзаков, А. С. Анализ методов теоретического исследования и расчета адаптивных аэростатических шпиндельных опор / А.С. Курзаков // Станки и инструмент. - 2003. - № 5. - С. 7–11.

Курзаков Андрей Сергеевич

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск

Доцент кафедры конструкторско-технологического обеспечения машиностроительных производств
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79

E-mail: kurzakov@list.ru

KURZAKOV A.S.

FEATURES OF LOAD-CARRYING CAPACITY FORMATION OF AN ADAPTIVE GAS-STATIC BEARING FOR PRECISION MEASUREMENT SYSTEMS

Abstract. This paper presents the design and analysis of an adaptive gasostatic bearing with a floating ring regulator, intended for use in the support system of measurement and diagnostic equipment, and providing improved accuracy and controllability in various applications. A key specificity of the proposed design is the ability to dynamically adjust the bearings characteristics, such as stiffness and damping, during operation. A mathematical model based on the discretization of gas layers and specialized software were developed to calculate the static load characteristics of the bearing. Two calculation algorithms, optimized for different operating regimes, including positive and negative compliance modes, are described. An analysis of the influence of control pressure and eccentricity of the elements on the load capacity and stability of the bearing was conducted. Conditions for achieving maximum load capacity, as well as cases of negative compliance and instability of the shaft position, were identified. The results of this study demonstrate the potential of actively controlled gas bearings to expand their application in precision equipment and require further research in the area of dynamic characteristics and control algorithms. The presented work can be useful for developers of precision instruments using gas bearings and researchers in the field of fluid dynamics.

Keywords: adaptive gasostatic bearing, floating ring regulator, damping, negative compliance, control pressure.

BIBLIOGRAPHY

1. Hirn, A. Study of principal phenomena shown by friction / A. Hirn // Bull soc. induster. Millhouse. - 1854. - Vol. XXVI. - P. 188–277.
2. Kingsbury, A. Experiments with air lubricated bearing / A. Kingsbury // Am. Soc. Nav. Eng. - 1897. - Vol. 9. - P. 267–292.
3. Petrov, N. P. Trenie v mashinakh i vliyanie na nego smazyvayushchey zhidkosti / N.P. Petrov. - Sankt-Peterburg : Tip. A. S. Suvorina, 1883. - 210 s.
4. Reynolds, O. On the theory of lubrication and its application to Mr. Beauchamp towers experiments, including an experimental determination of the viscosity of olive oil / O. Reynolds // Philosophical transactions of the Royal Society of London. - 1886. - Iss. 177. - P. 157–234.
5. Reynolds, O. XXVIII. On the flow of gases / O. Reynolds // The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. - 1886. - Vol. 21, Iss. 130. - P. 185–199. [<https://doi.org/10.1080/14786448608627834>] (<https://doi.org/10.1080/14786448608627834>)
6. Harrison, W. J. The Hydrodynamical Theory of Lubrication with Special Reference to Air as a Lubricant / W.J. Harrison // Trans. Cambridge Philos. Soc. - 1913. - Vol. 22. - P. 39–54.
7. Patent № US2086896A USA, MPK G01C19/38, Y10T74/1239, Y10T74/1282. Air supported gyroscope : № US734619A : zayavl. 1934.07.11 : opubl. 1937.07.13 / L.F. Carter ; Sperry Gyroscope Co Inc. - 8 p.
8. Patent № US2683635A USA, MPK F16C32/0618, F16C32/0622, F16C32/067, F16C32/0696. Air bearing : № US126757A : zayavl. 1949.11.12 : opubl. 1954.07.13 / M.W. Roy ; Filed by Individual. - 12 p.
9. Patent № US2683636A USA, MPK F16C32/0651, Y10S384/902, Y10T29/49639, Y10T74/12. Air bearing : № US126758A : zayavl. 1949.11.12 : opubl. 1971.07.13 / M.W. Roy ; Filed by Individual. - 5 p.
10. Patent № SU236138A1 СССР, MPK F16C 17/02, F16C 32/06. Gazostaticheskiy radialnyy podshipnik s vneshnim nadduvom : № 1120841/25-27 : zayavl. 1966.12.22 : opubl. 1969.01.24 / V.S. Vasilev. - 2 s.
11. Patent № SU184565A1 СССР, MPK F16C 33/04, F16C 32/06. Gazostaticheskiy radialno-upornyy podshipnik skolzheniya : № 909193/25-27 : zayavl. 1964.07.04 : opubl. 1966.07.21 / A.M. Kharitonov. - 2 s.
12. Sheynberg, S. A. Eksperimentalnoe issledovanie aerodinamicheskikh opor skolzheniya / S.A. Sheynberg // Trenie i iznos v mashinakh. - 1950. - № 6.
13. Sheynberg, S. A. Gazovaya smazka podshipnikov skolzheniya / S.A. Sheynberg // Trenie i iznos v mashinakh. - 1953. - № 8.
14. Sheynberg, S. A. Opori skolzheniya s gazovoy smazkoy / S.A. Sheynberg, V.P. Zhed, M.D. Shisheev. - Moskva : Mashinostroenie, 1979. - 336 s.

15. Pinegin, S. V. Opori s gazovoy smazkoy v turbomashinakh ogranicennoy moshchnosti / S.V. Pinegin, G.A. Pospelov, Yu.V. Peshti. - Moskva : Nauka, 1977. - 149 s.
16. Pinegin, S. V. Staticheskie i dinamicheskie kharakteristiki gazostaticeskikh opor / S.V. Pinegin, Yu.B. Tabachnikov, I.E. Sipenkov. - Moskva : Nauka, 1982. - 265 s.
17. Pinegin, S. V. Pretsisionnye opori kacheniya i opori s gazovoy smazkoy / S.V. Pinegin, A.V. Orlov, Yu.B. Tabachnikov. - Moskva : Mashinostroenie, 1984. - 215 s.
18. Peshti, Yu. V. Gazovaya smazka / Yu.V. Peshti. - Moskva : Izd-vo MGTU, 1993. - 381 s. - ISBN 5-7038-0942-8.
19. Sipenkov, I. E. Pretsisionnye gazovye podshipniki / I.E. Sipenkov, A.Yu. Filippov. - Sankt-Peterburg : Elektropribor, 2007. - 503 s. - ISBN 5-900780-63-5 (V per.).
20. Afonin, V. V. Rukovodyashchiy tekhnicheskiy material 108.129.101-76. Raschet radialnykh gazostaticeskikh podshipnikov turbomashin atomnoy energetiki / V.V. Afonin, N.N. Sidora, V.A. Semenov \[i dr.\]. - Leningrad : NPO TsKTI, 1976. - 86 s.
21. Breńkacz, Ł. Research and applications of active bearings: A state-of-the-art review / Ł. Breńkacz, Ł. Witanowski, M. Drosińska-Komor \[et al.\] // Mechanical Systems and Signal Processing. - 2021. - Vol. 151. - P. 107423. [<https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107423>] (<https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107423>)
22. Raparelli, T. Aerostatic thrust bearings active compensation: Critical review / T. Raparelli, V. Viktorov, F. Colombo \[et al.\] // Precision Engineering. - 2016. - 44, Vol. 44. - P. 1–12. [<https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2015.11.002>] (<https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2015.11.002>)
23. Gressem, N. S. Podshipniki s gazovoy smazkoy / N.S. Gressem, D.U. Pauell. - Moskva : Mir, 1966. - 423 s.
24. Al-Bender, F. Air bearings: theory, design and applications / F. Al-Bender. - Hoboken : John Wiley & Sons, 2021. - 592 p. - ISBN 1118511492.
25. Thomas, A. S. Design and status of the Spectroscopic Survey Telescope. In Proceedings of 1994 Symposium on Astronomical Telescopes and Instrumentation for the 21st Century, Kailua, Kona, HI, United States, 1 June 1994. - P. 565–572. [<https://doi.org/10.1117/12.176224>] (<https://doi.org/10.1117/12.176224>)
26. Kurzakov, A. S. Issledovanie rabotosposobnosti tekhnologicheskoy shpindelnoy opori / A.S. Kurzakov // Stanki i instrument. - 2013. - № 8. - S. 38–40.
27. Kurzakov, A. S. Raschyt parametrov adaptivnoy gazostaticeskoy shpindelnoy opori / A.S. Kurzakov // Vestnik mashinostroeniya. - 2013. - № 4. - S. 27–30.
28. Kurzakov, A. S. Issledovanie upravlyayemoy gazostaticeskoy shpindelnoy opori / A.S. Kurzakov // Tekhnologiya mashinostroeniya. - 2013. - № 12. - S. 25–27.
29. Kurzakov, A. S. Beskontaktnye adaptivnye shpindelnye opori dlya pretsizionnykh i vysokoskorostnykh metallorezhushchikh stankov / A.S. Kurzakov, S.N. Shatokhin // Tekhnologicheskoe obespechenie mashinostroitelnykh proizvodstv : sb. nauch. tr. I mezhdunarodnoy zaochno-nauchno-teknicheskoy konferentsii. - 2014. - № 1. - S. 310–314.
30. Loytsyanskiy, L. G. Mekhanika zhidkosti i gaza : Ucheb. dlya studentov vuzov / L.G. Loytsyanskiy. - Moskva : Drofa, 2003. - 840 s. - ISBN 5-7107-6327-6 (v per.).
31. Anderson, D. Vychislitelnaya gidromekhanika i teploobmen. V 2 tomakh. T. 1 / D. Anderson, D. Tannehill, R. Pletcher. - Moskva : Mir, 1990. - 385 s. - ISBN 5-03-001926-X.
32. Kameron, A. Teoriya smazki v inzhenernom dele: Per. s angl / A. Kameron, V.A. Borodin. - Moskva : Mashgiz, 1962. - 296 s.
33. Kurzakov, A. S. Razrabotka radialnykh aerostaticeskikh opor s plavayushchimi reguljatorami : spetsialnost 05.02.02 "Mashinovedenie, sistemy privodov i detali mashin" : dissertatsiya na soiskanie uchyonoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk / Kurzakov Andrey Sergeevich ; Krasnoyarskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet. - Krasnoyarsk, 2002. - 211 s.
34. Kurzakov, A. S. Analiz metodov teoreticheskogo issledovaniya i rascheta adaptivnykh aerostaticeskikh shpindelnykh opor / A.S. Kurzakov // Stanki i instrument. - 2003. - № 5. - S. 7–11.

Kurzakov Andrey Sergeevich

Siberian Federal University

Associate Professor of the Department of Design and Technological Support for Mechanical Engineering Production

79/10 Svobodny pr., Krasnoyarsk, Russia 660041

E-mail: kurzakov@list.ru

© Курзаков А.С., 2025

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

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПОГРЕШНОСТИ КАНАЛОВ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ВОЗДУШНЫХ СИГНАЛОВ С ФЮЗЕЛЯЖНЫМ ПРИЕМНИКОМ ПАРАМЕТРОВ НАБЕГАЮЩЕГО ПОТОКА

Аннотация. Указаны ограничения по применению систем измерения воздушных сигналов (ВС) с автономными распределенными приемниками и датчиками параметров набегающего воздушного потока (НВП) и разнесенным бортовым вычислителем. Обоснованы перспективы использования на различных классах летательных аппаратов (ЛА) информационно-измерительной системы (ИИС) ВС с одним интегрированным фюзеляжным приемником НВП и встроенным вычислителем. Рассмотрены особенности построения, модели входных информативных сигналов и определения выходных параметров такой ИИС ВС.

Для исследования динамических характеристик и погрешностей построена структурная схема, получены операторные чувствительности каналов измерения рассматриваемой ИИС ВС, в соответствие с которыми в операторной форме получены модели для определения собственной и вынужденной динамических погрешностей каналов измерения при типовых входных сигналах и внешней помехи в виде случайной атмосферной турбулентности, которые раскрываются применительно к каналу измерения истинной воздушной скорости ЛА.

Полученные результаты являются теоретической основой для проведения анализа и синтеза каналов измерения рассматриваемой ИИС ВС по критерию динамической точности при заданных воздействиях.

Ключевые слова: воздушные сигналы, информационно-измерительная система, интегрированный приемник потока, каналы измерения, операторные чувствительности, динамические погрешности, модели.

Введение

В основу работы известных ИИС ВС положено восприятие, преобразование и обработка информации о параметрах НВП [1, 2]. В широко используемых в авиации ИИС ВС с распределенными по поверхности и вынесенными за обшивку фюзеляжа автономными приемниками и датчиками параметров НВП, соединенными с разнесенным бортовым вычислителем [3 – 5], существенно усложняется конструкция, увеличивается масса и стоимость, повышается заметность траектории движения ЛА в пределах атмосферы, что ограничивает область применения таких ИИС ВС. Ряд отмеченных ограничений характерны и для вариантов ИИС ВС, в которых реализуются ионно-меточный и вихревой методы измерения параметров НВП [6, 7]. Все это обусловливает перспективы использования на ЛА различного класса и назначения ИИС ВС с одним интегрированным вписанным в контур фюзеляжа (фюзеляжным) приемником параметров НВП, особенности которой рассматриваются в работах [8, 9].

Конструктивная схема интегрированного фюзеляжного приемника параметров НВП и аналитические модели определения воздушных сигналов ИИС ВС.

Особенности восприятия параметров НВП и формирования первичных информативных сигналов рассматриваемой ИИС ВС иллюстрируется на рисунок 1 [8], где приведена конструктивная схема интегрированного фюзеляжного приемника параметров НВП, выполненного в виде плиты 1, устанавливаемой на обшивке фюзеляжа, на внешней обтекаемой поверхности плиты 1 установлено отверстие-приемник 2 для восприятия статического давления P_H НВП. Для уменьшения погрешностей восприятия статического давления, возникающей из-за аэродинамического искажения невозмущенного НВП в месте расположения интегрированного фюзеляжного приемника при движении ЛА и обтекания контура фюзеляжа на плите 1 установлен аэродинамический компенсатор 3. Место расположения аэродинамического компенсатора 3 относительно отверстия-приемника 2 определяется по результатам летных испытаний для конкретного типа ЛА и места установки плиты 1 на его фюзеляже из условий стабильного восприятия статического давления на характерных режимах полета ЛА.

С целью расширения функциональных возможностей интегрированного фюзеляжного приемника с аэродинамическим компенсатором погрешностей восприятия статического давления НВП в работе [3] предложено у основания аэродинамического компенсатора 3 под углом ϕ_0 к оси плиты 1 установить отверстия 4 для забора давлений P_1 и P_2 .

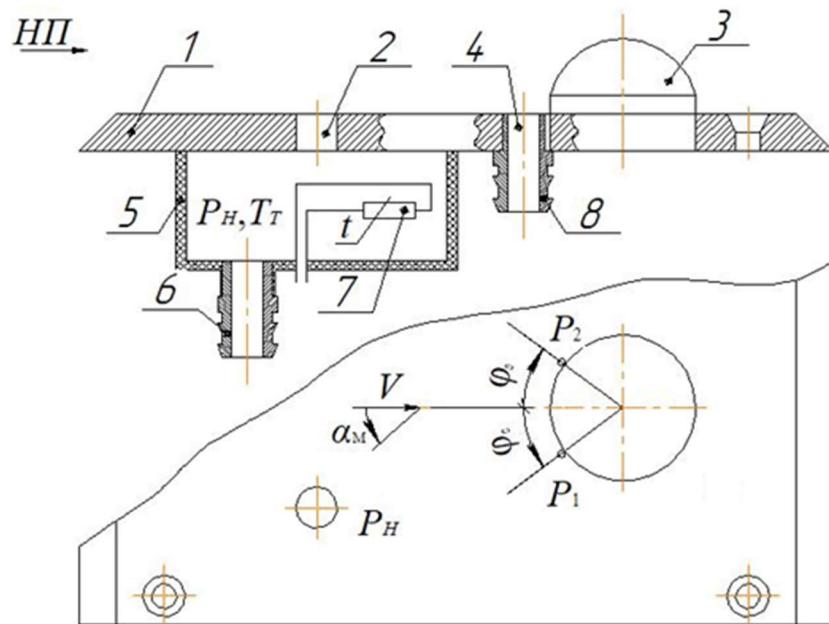


Рисунок 1 – Особенности конструктивной схемы интегрированного фюзеляжного приемника параметров НВП рассматриваемой ИИС ВС

Так как при обтекании фюзеляжа НВП в месте расположения отверстия-приемника 1 имеют место пульсации статического давления P_H , то с целью их уменьшения отверстие-приемник 2 соединен с глухой камерой 5. Сглаженное от пульсаций давление $P_{\text{ГК}}$ в глухой камере, равное по величине статическому давлению P_H НВП, является информативным сигналом ИИС ВС.

Для получения информации о температуре T_H наружного воздуха на текущей барометрической высоте H глухая камера 5 термоизолируется от внешней среды и в ней устанавливается терморезистор 7, который соединен с измерительной схемой ИС и регистрирует температуру T_t заторможенного НВП.

Глухая камера 5 через штуцер 6 соединена со входом датчика абсолютного давления ДАД, а также со входами датчиков перепада давлений ДПД1 и ДПД2, другие входы которых через штуцер 8 соединены с отверстиями 4 для восприятия давлений P_1 и P_2 . Тогда выходными сигналами датчиков ДПД1 и ДПД2 являются информативные перепады давлений $\Delta P_1 = P_1 - P_H$ и $\Delta P_2 = P_2 - P_H$.

Выходной сигнал ИС, пропорциональный температуре T_t , выходной сигнал датчика ДАД, пропорциональный статическому давлению P_H и выходные сигналы датчиков ДПД1 и ДПД2, пропорциональные перепадам давлений ΔP_1 и ΔP_2 , подаются на вход встроенного вычислителя В. Вычислитель В обеспечивает аналого-цифровое преобразование, обработку выходных сигналов датчика ДАД, измерительной схемы ИС и датчиков ДПД1 и ДПД2 и вычисление воздушных сигналов, определяющих движение ЛА относительно окружающей среды по полученным в работе [9] аналитическим моделям вида

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

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

$$V_{\text{пп}} = \frac{P_0}{\eta^2 \rho_0 V_{\text{пп}}} |\Delta P_1 + \Delta P_2| = K_{V_{\text{пп}}} |\Delta P_1 + \Delta P_2|; \quad (3)$$

$$M = \frac{P_0}{\eta^2 k g R \rho_0 T_0 M} \frac{|\Delta P_1 + \Delta P_2|}{P_H} = K_M \frac{|\Delta P_1 + \Delta P_2|}{P_H}; \quad (4)$$

$$T_H = \frac{T_t}{1 + 0,2\xi M^2} = K_{T_H} T_t; \quad (5)$$

$$\rho_H = \frac{\rho_0 T_0}{P_0} \frac{P_H}{T_H} = \frac{\rho_0 T_0}{P_0 K_{T_H}} \frac{P_H}{T_T} = K_{\rho_H} \frac{P_H}{T_T}; \quad (6)$$

$$H = \frac{T_0}{\tau} \left[1 - \left(\frac{P_H}{P_0} \right)^{\tau R} \right] = \frac{T_0}{\tau P_H} \left[1 - \left(\frac{P_H}{P_0} \right)^{\tau R} \right] = \frac{H}{P_H} P_H = K_H P_H; \quad (7)$$

$$V_y = \frac{dH}{dt} = K_H \frac{dP_H}{dt}, \quad (8)$$

где выходные сигналы α_m , V_B , V_{np} , M , T_H , ρ_H , H и V_y рассматриваемой ИИС ВС с интегрированным фюзеляжным приемником параметров НВП определяют угол атаки в месте установки интегрированного фюзеляжного приемника, истинную воздушную скорость, приборную скорость, число Маха, температуру наружного воздуха, плотность окружающей среды на текущей барометрической высоте H , барометрическая высота и вертикальная скорость движения ЛА.

В соответствии с аналитическими моделями в работе [10] разработаны модели и приведен анализ методических и инструментальных погрешностей измерительных каналов рассматриваемой ИИС ВС.

Приведенные конструктивная схема (рисунок 1) и аналитические модели (1) – (8) являются основой для определения динамических характеристик и динамических погрешностей каналов измерения ИИС ВС с интегрированным фюзеляжным приемником параметров НВП.

Структурная схема, динамические характеристики и динамические погрешности каналов измерения ИИС ВС с интегрированным фюзеляжным приемником параметров НВП.

Как показано в работах [11, 12] исследование динамических характеристик измерительных каналов приборов и систем проводится с использованием их операторных чувствительностей.

Для определения операторных чувствительностей каналов измерения рассматриваемой ИИС ВС, используя конструктивную схему, приведенную на рисунок 1, разработана структурная схема (рисунок 2), определяющая цепи преобразования первичных информативных сигналов контролируемого набегающего потока в выходные сигналы каналов измерения ИИС ВС с интегрированным фюзеляжным приемником параметров НВП.

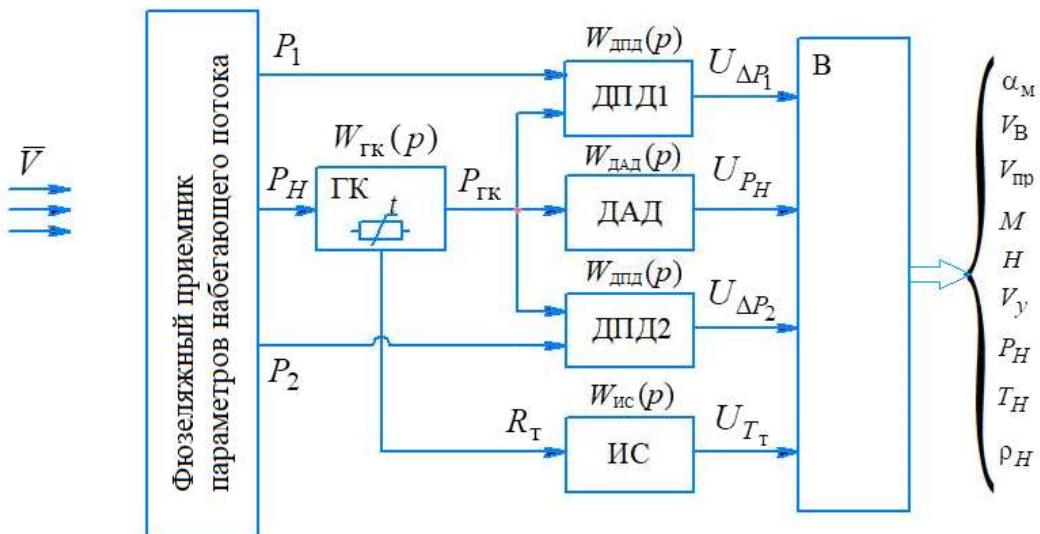


Рисунок 2 – Структурная схема информационно-измерительной системы воздушных сигналов с интегрированным фюзеляжным приемником набегающего потока

Как видно из рисунок 2, первичный информативный сигнал, формируемый интегрированным фюзеляжным приемником параметров НВП, в виде статического давления P_H с помощью глухой камеры, имеющей передаточную функцию $W_{GK}(p)$, преобразуется в сглаженный от пульсаций сигнал в виде давления P_{GK} в глухой камере. Сигнал в виде давления P_{GK} поступает на вход датчика абсолютного давления ΔAD , имеющий передаточную функцию

$W_{\text{ДАД}}(p)$ и на входы датчиков перепада давлений ДПД1 и ДПД2, на другие входы которых подаются давления P_1 и P_2 , формируемых интегрированным фюзеляжным приемником параметров НВП. На выходе датчика ДАД с передаточной функцией $W_{\text{ДАД}}(p)$ и на выходах датчиков ДПД1 и ДПД2, имеющих передаточную функцию $W_{\text{ДПД}}(p)$, формируются электрические сигналы U_{P_H} , U_{P_1} , U_{P_2} , которые поступают на вход вычислителя В. Сопротивление R_T , регистрирующего температуру T_t заторможенного НВП, с помощью измерительной схемы ИС, имеющей передаточную функцию $W_{\text{ИС}}(p)$, преобразуется в электрический сигнал U_{T_t} , который также поступает на вход вычислителя В.

Принимая, что аналого-цифровые преобразования, вычисления и формирования выходных сигналов в вычислителе В не вносят динамические искажения, операторные чувствительности измерительных каналов ИИС ВС будут определяться только элементами преобразования их первичных информативных сигналов.

Тогда для канала измерения местного угла атаки в соответствии со структурной схемой (рисунок 2) и моделью определения угла атаки (1) динамические характеристики измерительного канала местного угла атаки будут определяться операторной чувствительностью вида

$$W_{\alpha_m}(p) = W_{\text{гк}}(p)W_{\text{ДПД}}(p). \quad (9)$$

Для канала измерения истинной воздушной скорости с учетом модели (2) операторная чувствительность будет иметь вид

$$W_{V_B}(p) = K_{V_B}W_{\text{гк}}(p)W_{\text{ДПД}}(p)W_{\text{ДАД}}(p)W_{\text{ИС}}(p). \quad (10)$$

Для канала измерения приборной скорости с учетом модели (3) операторная чувствительность будет иметь вид

$$W_{V_{np}}(p) = K_{V_{np}}W_{\text{гк}}(p)W_{\text{ДПД}}(p). \quad (11)$$

Для канала измерения числа Маха с учетом модели (4) операторная чувствительность будет иметь вид

$$W_M(p) = K_MW_{\text{гк}}(p)W_{\text{ДАД}}(p)W_{\text{ДПД}}(p). \quad (12)$$

Для канала измерения барометрической высоты в соответствии с моделью (7) операторная чувствительность будет иметь вид

$$W_H(p) = K_HW_{\text{гк}}(p)W_{\text{ДАД}}(p). \quad (13)$$

Для канала измерения вертикальной скорости в соответствии с моделью (8) операторная чувствительность будет иметь вид

$$W_V(p) = K_HpW_{\text{гк}}(p)W_{\text{ДАД}}(p). \quad (14)$$

Для канала измерения статического давления на текущей барометрической высоте операторная чувствительность будет иметь вид

$$W_{P_H}(p) = W_{\text{гк}}(p)W_{\text{ДАД}}(p). \quad (15)$$

Для канала измерения температуры наружного воздуха в соответствии с моделью (6) операторная чувствительность будет иметь вид

$$W_{T_H}(p) = K_{T_H}W_{\text{гк}}(p)W_{\text{ДАД}}(p)W_{\text{ДПД}}(p)W_{\text{ИС}}(p). \quad (16)$$

Для канала измерения плотности на текущей барометрической высоте с учетом модели (6) операторная чувствительность будет иметь вид

$$W_{\rho_H}(p) = K_{\rho_H}W_{\text{гк}}(p)W_{\text{ДАД}}(p)W_{\text{ДПД}}(p)W_{\text{ИС}}(p). \quad (17)$$

Полученные операторные чувствительности позволяют исследовать собственные и вынужденные составляющие динамических погрешностей каналов измерения ИИС ВС с интегрированным фюзеляжным приемником параметров НВП.

Как показано в работах [11, 12], при известных операторных чувствительностях $W_{x_i}(p)$ измерительных каналов рассматриваемой системы изображения по Лапласу результирующих динамических погрешностей $\Delta Y_i(p)$ каналов измерения ИИС ВС при наличии внешней помехи ξ_i в операторной форме будут иметь вид

$$\Delta Y_i(p) = \Delta Y_{i_c}(p) + \Delta Y_{i_B}(p) = W_i(p)X_i(p) + W_i(p)\xi_i(p), \quad (18)$$

где $\Delta Y_{i_c}(p)$, $\Delta Y_{i_B}(p)$ – изображения собственной и вынужденной составляющих

результатирующей динамической погрешности i -го канала измерения; $X_i(p)$ – изображение входного сигнала $x_i(t)$ i -го канала; $\xi_i(p)$ – изображение внешней помехи ξ_i на входе i -го канала.

При исследовании собственных динамических погрешностей измерительных каналов приборов и систем, как правило, используются типовые входные сигналы $x_i(t)$, которые характеризуют наиболее неблагоприятные режимы его эксплуатации и описываются детерминированными функциями времени. Согласно анализу, в качестве типовых сигналов измерительных каналов бортовых приборов и систем используют скачкообразные изменения измеряемого параметра или изменения измеряемого параметра с постоянной скоростью.

Если при известных значениях корней характеристического уравнения операторной чувствительности (10), например канала измерения истинной воздушной скорости имеет один действительный корень $p_1 = -k_1$ и два комплексно-сопряженных корня $p_{2,3} = -k_{2,3} \pm j\omega_0$, то при скачкообразном изменении истинной воздушной скорости $V_b(t) = V_{b0}1[t]$ с уровнем скачка V_{b0} модель для определения собственной динамической погрешности рассматриваемого канала будет иметь вид [12]

$$\Delta V_{bc}(t) = -V_{b0} \left\{ \frac{k_2^2 + \omega_0^2}{(k_1 - k_2)^2 + \omega_0^2} e^{-k_1 t} + \left[\frac{k_1(k_1 - 2k_2)}{(k_1 - k_2)^2 + \omega_0^2} \cos \omega_0 t - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{k_1(\omega_0^2 - k_2^2 - k_1 k_2)}{\omega_0[(k_1 - k_2)^2 + \omega_0^2]} \sin \omega_0 t \right] \sin \omega_0 t \right\} e^{-k_2 t}. \quad (19)$$

При изменении измеряемого параметра с постоянной скоростью установившееся значение собственной динамической погрешности канала измерения истинной воздушной скорости будет определяться моделью вида

$$\Delta V_{bc} = -\frac{k_1}{k_0} \dot{V}_0, \quad (20)$$

где $\dot{V}_0 = const$ – величина постоянной скорости V_{b0} .

При более сложных законах изменения измеряемого параметра $x(t)$ рассматриваемой системы измерения ВС летательного аппарата для определения собственной динамической погрешности измерительных каналов ИИС ВС можно использовать методику работы [11].

Вынужденная динамическая погрешность каналов измерения рассматриваемой системы, например, канала измерения истинной воздушной скорости, определяется моделью вида

$$\sigma_{v \Delta V_B}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |W_{V_b}(p) - 1|^2 \Big|_{p=j\omega} \cdot S_{V_b}(\omega) d\omega, \quad (21)$$

где $S_{V_b}(\omega)$ – спектральная плотность мощности случайного стационарного процесса изменения истинной воздушной скорости; $\sigma_{v \Delta V_B}^2$ – дисперсия случайного стационарного процесса изменения истинной воздушной скорости, значение которой для характерных этапов полета ЛА приведено в работе [13], при этом модель спектральной плотности мощности имеет вид

$$S_{V_b}(\omega) = \frac{\sigma_{V_b}^2}{\pi} \frac{a_{V_b}}{a_{V_b}^2 + \omega^2}, \quad (22)$$

где a_{V_b} – величина, обратная по величине интервалу корреляции τ автокорреляционной функции стационарного случайного процесса изменения истинной воздушной скорости вида

$$K_{V_b}(\tau) = \sigma_{V_b}^2 e^{-a_{V_b}|\tau|}. \quad (23)$$

При полете летательного аппарата в пределах атмосферы основным характерным возмущением при измерении воздушных сигналов летательного аппарата является случайная турбулентность атмосферы, стационарную продольную составляющую которой можно характеризовать спектральной плотностью мощности вида [14]

$$S_{\xi}(\omega) = \frac{2\sigma_{\xi_x}^2 L_x}{\pi} \frac{1}{1 + \left(\frac{L_x}{V_B} \omega^2\right)^2}, \quad (24)$$

где L_x – масштаб атмосферной турбулентности по продольной оси связанной системы координат; $\sigma_{\xi_x}^2$ – дисперсия продольной атмосферной турбулентности.

Тогда дисперсия вынужденной динамической погрешности канала измерения истинной воздушной скорости ИИС ВС летательного аппарата с интегрированным фюзеляжным приемником параметров НВП будет определяться моделью вида (21).

Дисперсия результирующей динамической погрешности канала измерения истинной воздушной скорости рассматриваемой системы будет определяться моделью

$$\sigma_{\Delta V_B}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |W_{V_B}(p) - 1|_{p=j\omega}^2 \cdot S_{V_B}(\omega) d\omega + \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |W_{V_B}(p)|_{p=j\omega}^2 \cdot S_{\xi_x}(\omega) d\omega. \quad (25)$$

Из выражения (25) следует, что для уменьшения собственной составляющей динамической погрешности измерительного канала операторную чувствительность $W_{V_B}(p)$ необходимо приближать к единице, но при этом вынужденная составляющая динамической погрешности канала стремится к максимальному значению. Это определяет постановку задачи минимизации дисперсии результирующей динамической погрешности каналов измерения системы с использованием оптимального линейного фильтра Винера, методика решения которой приведено в работе [12].

Рассмотренная и полученные модели методика позволяют решать задачу определения моделей динамических погрешностей других каналов измерения рассматриваемой ИИС ВС.

Заключение

Таким образом, разработанная структурная схема, полученные модели операторных чувствительностей и составляющих динамической погрешности каналов являются теоретической основой для решения задач анализа и синтеза каналов информационно-измерительной системы воздушных сигналов с интегрированным фюзеляжным приемником параметров набегающего воздушного потока при заданных детерминированных и стационарных случайных законах изменения измеряемых воздушных сигналов и внешних помех. Для минимизации динамических погрешностей каналов при случайных воздействиях целесообразно использовать оптимальный линейный фильтр Винера.

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. Клюев Г.И. Измерители аэродинамических параметров летательных аппаратов / Г.И. Клюев, Н.Н. Макаров, В.М. Солдаткин, И.П. Ефимов / Под ред. В.А. Мишина. – Ульяновск: Изд-во УлГТУ. – 2005. – 509с.
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 – Полет. – 2009. – 760с.
6. Крылов Д.Л. Построение и оценка точности системы воздушных сигналов самолета с невыступающим приемником потока / Д.Л. Крылов, В.М. Солдаткин, Е.С. Солдаткина // 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. 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. Опубл. 12.05.1970. – Бюл. – № 17. – 3с.
9. Солдаткин В.М. Информационно-измерительная система воздушных сигналов летательного аппарата с интегрированным фюзеляжным приемником параметров набегающего воздушного потока / В.М. Солдаткин, В.В. Солдаткин, Е.С. Ефремова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2024. – № 5 (367). – С. 52-59.

10. Ефремова Е.С. Исследование погрешностей информационно-измерительной системы воздушных сигналов с интегрированным фюзеляжным приемником набегающего воздушного потока / Е.С. Ефремова, В.В. Солдаткин, В.М. Солдаткин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологий. – 2025. – № 3 (371). – С. 145-152.
11. Браславский Д.А. Точность измерительных устройств / Д.А. Браславский, В.В. Петров. – М: Машиностроение. – 1976. – 312с.
12. Солдаткин В.В. Анализ погрешностей и методы повышения точности измерительных приборов и систем: Учебное пособие / В.В. Солдаткин, В.М. Солдаткин. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. – 2009. – 248с.
13. Иванов Ю.П. Комплексирование информационно-измерительных устройств летательных аппаратов / Ю.П. Иванов, А.Н. Синяков, И.В. Филатов. – Л.: Машиностроение, 1984. 208 с.
14. Макаров Н.Н. Системы обеспечения безопасности функционирования бортового эргодического комплекса: теория, проектирование, применение: Монография Н.Н. Макаров, под ред. докт. техн. наук В.М. Солдаткина. – М.: Машиностроение, 2009. 760 с.

Ефремова Елена Сергеевна

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань, Доцент кафедры электронного приборостроения и менеджмента качества
420111, г.Казань, ул. К.Маркса, д. 10
тел. 8(843)231-03-60
E-mail: soldatkina1991@bk.ru

Солдаткин Владимир 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

Козловский Роман Владимирович

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань, Магистр кафедры электронного приборостроения и менеджмента качества
420111, г.Казань, ул. К.Маркса, д. 10
тел. 8(843)231-03-60
E-mail: w-soldatkin@mail.ru

Солдаткин Владимир Сергеевич

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань, Магистр 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

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

DYNAMIC CHARACTERISTICS AND CHANNEL ERRORS OF THE INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM OF AIR SIGNALS WITH A FUSELAGE RECEIVER OF INCOMING FLOW PARAMETERS

Annotation. The limitations of the application of air signal measurement systems (AS) with autonomous distributed receivers and sensors of the incident air flow (IAF) parameters and a distributed on-board computer are specified. The prospects for using the information and measuring system (IMS) of the AS with one integrated fuselage receiver of the IAF and a built-in computer on various classes of aircraft (A). The design features, models of input information signals and determination of output parameters of such an IIS of the AS are considered.

To use the dynamic characteristics and errors, a structural diagram is constructed, operator sensitivities of the measurement channels of the considered IIS of the AS are obtained, in accordance with which models are obtained in the operator form for determining the intrinsic and forced dynamic errors of the measurement channels with typical input signals and external interference in the form of random atmospheric turbulence, which are disclosed in relation to the channel for measuring the true airspeed of the aircraft.

The obtained results are the theoretical basis for the analysis and synthesis of measurement channels of the considered IIS VS according to the criterion of dynamic accuracy under given impacts.

Keywords: air signals, information and measuring system, integrated flow receiver, measurement channels, operator sensitivities, dynamic errors, models.

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 ustankovkami / 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 UlGTU. – 2005. – 509s.
5. Makarov N.N. Sistemy obespecheniya bezopasnosti funktsionirovaniya bortovogo ergodicheskogo 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 vozдушных signalov samoleta s nevystupayushchim priyemnikom potoka / D.L. Krylov, V.M. Soldatkin, E.S. Soldatkina // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2015. – № 3(11). – S. 128-136.
7. Efremova E.S. Metodicheskiye i instrumentalnyye pogreshnosti vikhrevoy sistemy kontrolya vysotnoskorostnykh parametrov poleta / E.S. Efremova, R.V. Soldatkin // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2017. – № 2(322). – S. 126-135.
8. Patent SU 271140, MKI G01P 5/12. Fyuzelyazhnnyy priyemnik staticeskogo 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. Efremova E.S. Issledovaniye pogreshnostey informatsionno-izmeritelnoy sistemy vozдушных signalov s integrirovannym fyuzelyazhnym priyemnikom nabegayushchego vozduшного потока / E.S. Efremova, V.V. Soldatkin, V.M. Soldatkin // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2025. – № 3 (371). – S. 145-152.
11. Braslavskiy D.A. Tochnost izmeritelnykh ustroystv / D.A. Braslavskiy, V.V. Petrov. – M: Mashinostroyeniye. – 1976. – 312s.
12. Soldatkin V.V. Analiz pogreshnostey i metody povysheniya tochnosti izmeritelnykh priborov i sistem: Uchebnoye posobiye / V.V. Soldatkin, V.M. Soldatkin. – Kazan: Izd-vo Kazan. gos. tekhn. un-ta. – 2009. – 248s.
13. Ivanov YU.P. Kompleksirovaniye informatsionno-izmeritelnykh ustroystv letatelnykh apparatov / YU.P. Ivanov, A.N. Sinyakov, I.V. Filatov. – L.: Mashinostroyeniye. – 1984. – 208s.
14. Makarov N.N. Sistemy obespecheniya bezopasnosti funktsionirovaniya bortovogo ergodicheskogo kompleksa: teoriya, proyektirovaniye, primeneniye: Monografiya N.N. Makarov, pod red. dokt. tekhn. nauk V.M. Soldatkina. – M.: Mashinostroyeniye, 2009. 760 s.

Efremova Elena Sergeevna

FSBEI HE «Kazan National Research Technical University named after A.N.Tupolev-KAI», Kazan, Associate Professor of Department of Electronic Instrument Making and Quality Management
420111, Kazan, K.Marksa str,10
Ph. 8(843)231-03-60
E-mail: soldatkina1991@bk.ru

Soldatkin Vyacheslav Vladimirovich

FSBEI HE «Kazan National Research Technical University named after A.N.Tupolev-KAI», Kazan, Professor of Department of Electronic Instrument Making and Quality Management
420111, Kazan, K.Marksa str,10
Ph. 8(843)231-03-60
E-mail: w-soldatkin@mail.ru

Soldatkin Vladimir Sergeevich

FSBEI HE «Kazan National Research Technical University named after A.N.Tupolev-KAI», Kazan, Master of Department of Electronic Instrument Making and Quality Management
420111, Kazan, K.Marksa str,10
Ph. 8(843)231-03-60
E-mail: w-soldatkin@mail.ru

Soldatkin Vladimir Mikhailovich

FSBEI HE «Kazan National Research Technical University named after A.N.Tupolev-KAI», Kazan, Professor of Department of Electronic Instrument Making and Quality Management
420111, Kazan, K.Marksa str,10
Ph. 8(843)231-03-60
E-mail: w-soldatkin@mail.ru

Kozlovsky Roman Vladimirovich

FSBEI HE «Kazan National Research Technical University named after A.N.Tupolev-KAI», Kazan, Master 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

ВАСИЛЬЕВА И.Е., САЙБЕЛЬ А.Г.

ОБ ОБЕСПЕЧЕНИИ ОПТИМАЛЬНОГО ВЫБОРА И СОЗДАНИИ СТАБИЛЬНОЙ СВЕТОВОЙ КАРТИНЫ ПОСРЕДСТВОМ СВЕТОДИОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

Аннотация. Появление светодиодного освещения не только открыло новые возможности, но и создало человечеству неожиданные трудности. В процессе применения светодиодных систем освещения возможно столкновение с самыми различными эффектами: от светового загрязнения городов и поселков до нарушений в работе сетей электроснабжения. Отдельные пользователи традиционных систем освещения, изготовленных на основе ламп накаливания и люминесцентных ламп, привыкшие к идентичности создаваемых этими источниками световых потоков и простоте компоновки систем освещения, в процессе оснащения помещений светодиодными источниками света не учитывают многообразия особенностей светового излучения и технических характеристик современных источников, что может приводить не только к неудовлетворенности качеством создаваемых световых картин, но даже к необходимости полной переработки систем освещения.

В настоящей статье рассматриваются наиболее распространенные особенности светодиодных источников света с точки зрения проектировщиков систем освещения, систематизированы характеристики и приведены примеры учета характеристик светодиодных светильников, относящихся к различным группам, а также изложен опыт авторов в части выбора источников с целью обеспечения выполнения предъявляемых к системам освещения требований.

Ключевые слова: светодиодные источники света, световая картина, требования к системам освещения, программа DIALUX, оптимальный выбор светодиодных светильников.

Введение

По мере перехода на светодиодное освещение, пользователи получили возможность создания сколь угодно сложных картин освещенности помещений, которые соответствуют современным требованиям [1], однозначно устанавливающим нормативы для различных объектов. В зависимости от пожеланий заказчиков, успешно создаются и эксплуатируются как простейшие монохромные, так и сложные цветодинамические системы с программным управлением.

Изменение физической природы источников света привело к появлению нового класса объектов, имеющего постоянно расширяющийся спектр характеристик, и требующего регулярного обновления знаний в динамично развивающемся направлении. Известные исследования чаще всего описывают отдельные области требований, в то время как на практике необходимо учитывать не только наиболее распространенные характеристики, но и специфические частные требования. В статье изложен опыт исследований, позволяющий свести задачу многокритериальной оптимизации к процессу ранжирования требований к проектируемой системе освещения и выбору источников света из имеющихся баз данных.

Специфика световых картин светодиодных источников света

С детства знакомые большинству из нас лампы накаливания имеют такие основные характеристики как потребляемая мощность, излучаемый световой поток, напряжение питания и механические, описывающие вид цоколя и габариты лампы. Вольфрамовая нить, которую можно рассматривать как множество точечных излучателей света (рисунок 1), уже на расстоянии 2 - 3 метров от лампы создает равномерную световую картину, близкую к сферической форме, в отличие от светодиодов, которые, исходя из конструкции, создают максимум полусферический световой поток (рисунок 2).

Состоящий из нескольких светодиодов источник света создает сложную пространственную форму излучения, зависящую от диаграммы направленности и расположения каждого из светодиодов, характеристик напряжения питания, температуры окружающего воздуха и других факторов.

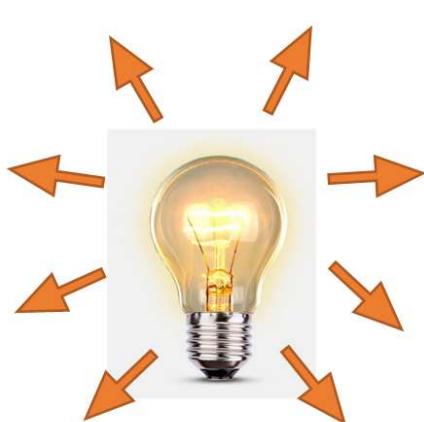


Рисунок 1 – Излучение лампы накаливания

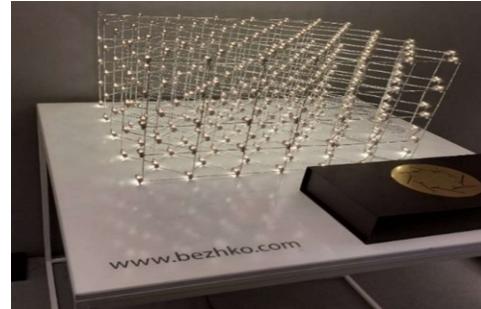


Рисунок 2 - Различные варианты светодиодов

Для формирования необходимой световой картины производителям приходится размещать точечные диоды на поверхностях оригинальной формы (рисунок 3 - создание световой картины, идентичной картине от лампы накаливания) или разрабатывать новые пространственные решения (рисунок 4). Регулирование величины и направления светового потока, цветовой температуры, индекса цветопередачи, степени защиты от неблагоприятных факторов окружающей среды и многих других характеристик предоставляет бесконечные возможности. Количество моделей светодиодных источников света во всем мире исчисляется сотнями тысяч, каждая из которых имеет свои особенности конструкции, пространственного светового потока и энергетических характеристик.



*Рисунок 3 – Лампа полупроводниковая
сигнальная ЛПС – 16, ЗАО «Протон-Импульс*



*Рисунок 4 – Пространственное решение
ООО «Бежко»*

Подтверждение эволюции светодиодных источников света отражает динамика номенклатуры основных показателей, декларируемая в государственных стандартах. Например, если стандарт [2] 2013 года содержит требования по пяти светотехническим показателям, относящимся к различным видам помещений, стандарт [3] 2017 года регламентирует двенадцать разноплановых показателей светодиодных светильников, то стандарты [4, 5] 2021 года разделяют требования к светильникам на светотехнические и в части энергоэффективности, подробно рассматривая каждый показатель. Таким образом, число возможных показателей характеристик светодиодных светильников Π_x растет от 5 до десятков и сотен, предполагая почти бесконечное значение числа моделей светильников.

Также необходимо отметить разнообразие терминов, которыми может описываться один и тот же показатель. Например, ставшее привычным понятие «энергоэффективность», отражающее величину излучаемого светового потока в люменах на 1 Вт потребляемой

источником света электрической мощности, в [4] определяется как «светоотдача», в том же документе уточняются некоторые другие привычные названия.

На практике зачастую возникают ситуации выборочного обеспечения заданных заказчиком характеристик (например, величины светового потока источника света или обеспечения величины уровня освещенности на конкретной поверхности) без учета остальных особенностей выбранных источников света и мест установки, что может привести к трудностям и экономическим потерям в процессе эксплуатации. В таблице 1 приведены наиболее часто учитываемые характеристики светодиодов и возможные причины их изменений, о которых предлагается задумываться до приобретения светильников.

Таблица 1 – Изменения характеристик светодиодных светильников

Наименование характеристики	Основные причины изменения	Способы стабилизации
Величина светового потока, лм	Деградация кристаллов со временем, повышенные и пониженные температуры, помутнение первичной оптики, механические повреждения светодиодов из-за внутренних напряжений	Обеспечение номинальных режимов работы, выбор надежных производителей
Цветовая температура, К	Неравномерная деградация цветности RGB-светодиодов со временем, из-за токовых и тепловых перегрузок	Обеспечение номинальных режимов работы, выбор надежных производителей
Коэффициент пульсации светового потока, %	Выход из строя сглаживающего конденсатора драйвера (блока питания)	Выбор более качественных конденсаторов, замена конденсатора
Индекс цветопередачи <i>CRI</i>	Состав люминофора, качество светодиодов, обеспечиваемое технологией их производства	Выбор надежных производителей светодиодов
Энергоэффективность, лм/Вт	Зависит от качества светодиодов; в определенных пределах обратно пропорциональна рабочему току	Выбор надежных производителей и соблюдение рабочих режимов светодиодов

Например, цветовая температура иногда описывается как «теплый белый», «нейтральный белый» или «холодный белый» цвет свечения, чего в современных условиях может быть недостаточно для качественного выбора (совпадения цветовой температуры в случае установки в одном помещении светильников разных производителей).

Не все производители указывают коэффициент пульсации светового потока и индекс цветопередачи, что особенно важно в детских учреждениях и на рабочих местах, оборудованных ПК, где желательно иметь коэффициент пульсации менее 5 % и значение *CRI* 70 и более. Известны модели светильников с коэффициентами энергоэффективности от 6,7 до 150 и более лм/Вт, что может оказывать решающее влияние на выбор светильника.

Требования к светодиодным системам освещения

Известно, что смоделировать картину светового потока проектируемой системы освещения можно двумя способами: временным размещением в освещаемом помещении одного или нескольких светильников выбранного типа на предназначенных для установки местах или компьютерным моделированием в специально разработанных программах.

Возможно, например, как создание программы расчета системы освещения путем программирования на графическом языке (C++) [6], или применение специальной программы моделирования картин освещения, такой как *DIALUX*. Для решения данной задачи производители светодиодных светильников создают так называемые *ies*- файлы, однозначно описывающие световую картину, создаваемую конкретной моделью светильника. Программа

DIALUX рассчитывает на основе *ies*- файлов пространственную картину освещенности, учитывающую габариты, структурные элементы и многие другие особенности помещения.

В качестве примера на рисунке 5 приведен фрагмент отчета программы *DIALUX.evo*, содержащий световую картину освещения помещения размерами 8х6 м и высотой 2,8 м на уровне рабочей поверхности 0,8 м.

В противоположных углах на потолке размещены светильники двух разных производителей, имеющие близкие значения светового потока $\Phi = 2011$ (светильник взрывозащищенный BC15, ООО «Электролуч»), и $\Phi = 1904$ лм (светильник SL18, ЦПТА).

Наблюдаются достаточно похожие световые картины, показанные в виде изолюкс (линий, соединяющих точки с одинаковой освещенностью), причем площадь, освещаемая светильником BC15, немного больше площади, освещаемой светильником SL18, характер освещенности, создаваемый BC15, – более равномерный.

На рисунке 6 представлен технический паспорт светильника BC15, входящий в отчет программы *DIALUX.evo*, в котором отражены отдельные характеристики светильника. По сравнению с информацией с рисунка 4, можно отметить некоторое снижение среднего значения величины светового потока Φ , возрастание значения индекса цветопередачи *CRI* до 100 (что соответствует солнечному свету или эталонному излучателю), а также появление некоторой величины $\eta = 100,00\%$, которую привыкли идентифицировать как значение КПД (коэффициента полезного действия) электрических установок. В стандарте [4] η определяется как понятие светоотдачи, которое также не подходит в данном случае ввиду заявленного значения светоотдачи 130 лм/Вт.

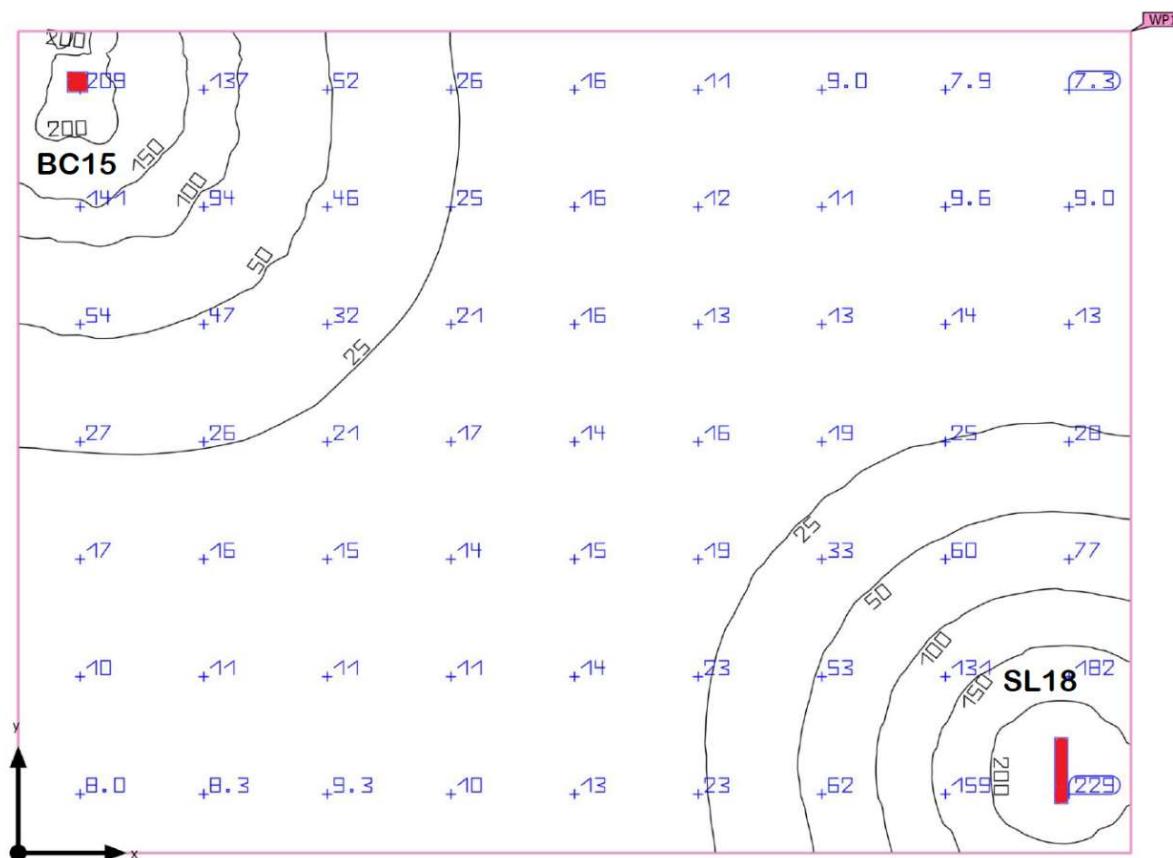
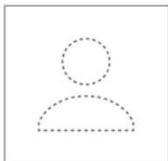


Рисунок 5 – Световая картина, фрагмент отчета программы *DIALUX*

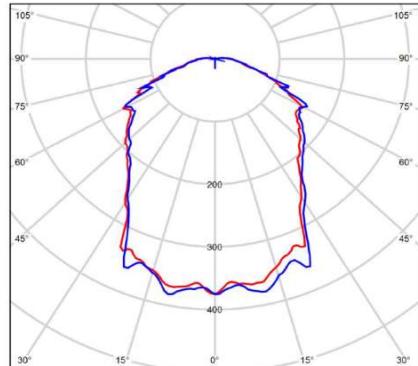
Приведенный выше пример иллюстрирует появление явления полисемии (вложения разных смыслов в одно и то же понятие), что предполагает необходимость творческого осмысливания получаемой от поставщиков и производителей информации.

Техпаспорт изделия

Не является партнером DIALux - Plafon VS-15-P16-230 (A220T045C042H78-003, C067.02.01)



№ изделия	N/A
P	15.4 W
Флампа	2011 lm
ФСветильник	2011 lm
η	100.00 %
Светоотдача	130.8 lm/W
CCT	3000 K
CRI	100



Полярные LDC

Рисунок 6 – Техпаспорт на светильник BC15 из отчета DIALux

Оптимизация систем светодиодного освещения

В качестве следствия неуклонно возрастающего многообразия вариантов выступает необходимость выявления и оптимизации характеристик выбираемых источников света.

Как рассмотрено выше, число применяемых на практике характеристик светодиодных источников света настолько возросло, что для их исследования и практического использования имеет смысл разбить показатели на отдельные группы. В таблице 2 представлены примеры характеристик, относящиеся к отдельным группам, а также выявленные в процессе продолжения исследований этапы и методы их контроля.

Значительная часть требований, относящихся к первой и второй группам, таких как влияние освещения на различные системы и органы человека, подробно описана в фундаментальном труде [7], способы создания эстетически приятного света за счет гармоничного распределения программируемого цветового освещения рассмотрены в [8], примеры технико-экономических требований, таких как учет потребляемой мощности, количества устанавливаемых светильников в соотношении с созданием достаточного уровня освещенности в сочетании с соблюдением режимов работы описаны в [9, 10]. Статья [11], содержание которой можно отнести к требованиям электробезопасности, предупреждает о возможном возникновении нежелательных эффектов в цепях питания светодиодных источников и их предотвращении.

Работа [12], посвященная светобиологической безопасности, говорит о возникшем световом загрязнении в подавляющем большинстве городов и населенных пунктов, как о новой международной проблеме, от которой страдают не только люди, но и многие представители животного и растительного мира.

Очевидно, что для каждой конкретной системы освещения приоритетным является некоторый набор требований, который желательно определить к моменту начала проектирования. Если число приоритетных требований не велико и удается однозначно выбрать светильники из числа доступных, то задачу выбора можно считать решенной.

В нестандартных ситуациях (полевые условия, повышенное или пониженное атмосферное давление и т. д.) часто возникают ситуации необходимости учета нескольких близких по значимости критериев, то есть решения задачи многокритериальной оптимизации.

В таком случае заказчик, совместно с проектирующей организацией, ранжирует предъявляемые требования, что обеспечивает возможность формирования рангингового ряда

из числа доступных моделей светильников на основе многокритериальной оптимизации как вручную, так и программным способом [13, 14].

Таблица 2 – Группы требований к светодиодным системам освещения

Группы требований к освещению и примеры характеристик	Этапы выбора и контроля характеристик
Сохранение здоровья и обеспечение суточных ритмов человека: регулируемые значения коррелированной цветовой температуры, спектральный состав излучения, равномерность светового потока, минимизация блескости	На этапе выбора источников света – по информации изготовителя, в соответствии с требованиями заказчика; минимизация блескости – на этапах выбора материалов и расположения рабочих поверхностей. Контроль характеристик в процессе сборки
Обеспечение продуктивности труда, творческие способности и качественный сон: оптимальные для решаемой задачи уровни освещенности поверхностей, индекс цветопередачи, равномерность светового потока и цветовая температура	На этапе выбора источников света – по информации изготовителя, в соответствии с действующими нормативами и учетом требований заказчика. Контроль характеристик в процессе сборки и наладки систем освещения; контроль уровней освещенности поверхностей в процессе эксплуатации
Эстетически приятный свет, обеспечивающий качественное цветовое восприятие: обеспечение оптимального сочетания индекса цветопередачи, спектрального состава излучения и равномерности светового потока	Предварительное натурное и компьютерное моделирование на основе характеристик, заявленных изготовителем источников света и требований заказчика
Технико-экономические требования: применение светильников, оптимизированных для решения поставленной задачи: учет значения энергоэффективности при выборе необходимой величины светового потока, степень пылевлагозащиты, затраты на ремонт и техобслуживание...	На этапе выбора светильников: соотношение требований заказчика и информации изготовителя светильников; контроль характеристик в процессе сборки и эксплуатации системы освещения
Требования безопасности: влияние на окружающую среду: ультрафиолетовое излучение, нагрев пространства и электромагнитные излучения блоков питания (драйверов); влияние на сеть электропитания (наводки драйверов); светобиологическая безопасность (влияние на живые организмы, особенно – в ночное время), пожарная безопасность...	На этапе выбора светильников – запрос необходимых характеристик у производителя; контроль характеристик и физического состояния светильников в процессе сборки и эксплуатации систем освещения. Предварительное исследование мест размещения систем освещения с точки зрения воздействия на живые организмы

Заключение

Изложенные выше материалы и рекомендации отражают динамику и создают возможность сколь угодно полного учета особенностей светодиодных источников света в процессе разработки, изготовления и эксплуатации светодиодных систем освещения, что способствует поддержанию работоспособности и сохранению здоровья пользователей при одновременной экономии временных и материальных ресурсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Главный государственный санитарный врач Российской Федерации. Постановление от 28 января 2021 года № 2 Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания" / – Введены в действие 01.03.2021, с изм. на 30 декабря 2022 г.
2. ГОСТ Р 55710-2013 Освещение рабочих мест внутри зданий. Нормы и методы измерений. М., Стандартинформ, 2016, 20 с.
3. ГОСТ IES/PAS 62722-2-1-2017 Светильники. Часть 2-1. Частные требования к характеристикам светильников со светодиодными источниками света. М., Стандартинформ, – 2020. – 15 с.
4. ГОСТ Р 59294-2021. Национальный стандарт РФ Источники света, осветительные приборы и системы искусственного освещения. Показатели энергоэффективности и требования. – М.: Российский институт стандартизации, 2021, 23 с.
5. ГОСТ 34819-2021. Приборы осветительные. Светотехнические требования и методы испытаний. – М.: Российский институт стандартизации, 2022, – 58 с.
6. Бакиров С. М., Широбокова Т. А. Методика расчета и моделирования светодиодных осветительных приборов // Вестник НГИЭИ. 2022. № 4 (131). С. 31–40.
7. Капцов В.А., Дейнего В.Н. Эволюция искусственного освещения: взгляд гигиениста / под ред. М.Ф. Вильк, В.А. Капцова. М.: РАН, 2021. 632 с.
8. Евтеева А.В., Марченко М.Н. Особенности создания монохромного дизайна интерьера // Наукосфера. 2022. – 12(1). С. 21–25.
9. Кузьменко В.П. Разработка алгоритма оптимального выбора количества и расположения осветительных приборов в офисном помещении // Перспективы науки. – 2023. – 11(170). С. 117–121.
10. Стэпан Д. В. Повышение эффективности энергосбережения изолированного объекта (на примере кампуса Дальневосточного федерального университета) / Д. В. Стэпан // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии. – 2024. – 17(2). С. 193–204.
11. Кузьменко В.П., Солёный С.В. Модель предиктивного обслуживания для управления качеством сетей светодиодного освещения // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №3. С. 155–169.
12. Курочкина, В. А. Световое загрязнение как фактор влияния на человека и окружающую среду / В. А. Курочкина, А. Е. Жирякова // Вестник евразийской науки. – 2022. – Т. 14. – № 1. 17 с.
13. Васильева И.Е. Алгоритм выбора источников света в процессе проектирования светодиодных систем освещения малых помещений военного назначения // Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей». – 2022. – 4. С. 91–100.
14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022614115 Российской Федерации. Программа ранжирования многопараметрических элементов в соответствии с предъявляемыми частными требованиями : № 2022611739 : дата государственной регистрации 17.03.2022 / Васильева И.Е., Сайтель А.Г.

Васильева Ирина Евгеньевна;

Акционерное общество «Северо-Западный региональный центр Концерна ВКО «Алмаз-Антей» – Обуховский завод»;
к. т. н., ведущий инженер-конструктор;
192012, г. Санкт-Петербург, пр. Обуховской обороны, д. 120, стр. 19, помещ. 1-Н;
раб. тел. (812) 363-95-63;
моб. тел. 911-299-7000;

Сайтель Алексей Геннадиевич;

Акционерное общество «Северо-Западный региональный центр Концерна ВКО «Алмаз-Антей» – Обуховский завод»;
д.т.н., доцент, профессор Научно-образовательного центра;
192012, г. Санкт-Петербург, пр. Обуховской обороны, д. 120, стр. 19, помещ. 1-Н;
моб. тел. 921-744-3756;
a.saybel@goz.ru

VASILIEVA I.E., SAIBEL A.G.

ON ENSURING OPTIMAL SELECTION AND CREATION OF A STABLE LIGHT PAINTING BY MEANS OF LED LIGHT SOURCES

Annotation. The emergence of LED lighting has not only opened new opportunities, but also created unexpected challenges for mankind. In the process of application of LED lighting systems it is possible to encounter a variety of effects: from light pollution of cities and towns to disruptions in the operation of power supply networks. Some users of traditional lighting systems made on the basis of incandescent and fluorescent lamps, accustomed to the identity created by these sources of light streams and the simplicity of the layout of lighting systems, in the process of equipping the premises with LED light sources do not take into account the variety of features of light emission and technical

characteristics of modern sources, which can lead not only to dissatisfaction with the quality of light patterns, but even the need for a complete redesign of systems.

This article examines the most common features of LED light sources from the point of view of lighting system designers, systematized characteristics and examples of taking into account the characteristics of LED luminaires belonging to different groups, as well as set out the experience of the authors in terms of selecting sources to ensure compliance with the requirements for lighting systems.

Keywords: *LED light sources, light painting, lighting system requirements, DIALUX program, optimal choice of LED luminaires.*

BIBLIOGRAPHY

1 Glavny'j gosudarstvenny'j sanitarny'j vrach Rossijskoj federacii. Postanovlenie ot 28 yanvarya 2021 goda N 2 Ob utverzhdenii sanitarny'x pravil i norm SanPiN 1.2.3685-21 "Gigienicheskie normativy' i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy' obitaniya" / – Vvedeny' v dejstvie 01.03.2021, s izm. na 30 dekabrya 2022 g.

2 GOST R 55710-2013 Osveshhenie rabochix mest vnutri zdanij. Normy' i metody' izmerenij. M, Standartinform, 2016, 20 s.

3 GOST IES/PAS 62722-2-1-2017 Svetil'niki. Chast' 2-1. Chastny'e trebovaniya k xarakteristikam svetil'nikov so svetodiodny'mi istochnikami sveta. M., Standartinform, – 2020. – 15 s.

4 GOST R 59294-2021. Nacional'ny'j standart RF Istochniki sveta, osvetitel'ny'e pribory' i sistemy' iskusstvennogo osveshheniya. Pokazateli e'nergoeffektivnosti i trebovaniya. – M.: Rossijskij institut standartizacii, 2021, 23 s.

5 GOST 34819-2021. Pribory' osvetitel'ny'e. Svetotekhnicheskie trebovaniya i metody' ispy'tanij. – M.: Rossijskij institut standartizacii, 2022, – 58 s.

6 Bakirov S. M., Shirobokova T. A. Metodika rascheta i modelirovaniya svetodiodny'x osvetitel'ny'x priborov // Vestnik NGIE'I. 2022. № 4 (131). S. 31–40.

7 Kapczov V.A., Dejnega V.N. E'volyuciya iskusstvennogo osveshheniya: vzglyad gigienista / pod red. M.F.Vil'k, V.A.Kapczova. M.: RAN, 2021. 632 s.

8 Evteeva A.V., Marchenko M.N. Osobennosti sozdaniya monoxromnogo dizajna inter'era // Naukosfera. 2022. – 12(1). S. 21-25.

9 Kuz'menko V.P. Razrabotka algoritma optimal'nogo vy'bora kolichestva i raspolozheniya osvetitel'ny'x priborov v ofisnom pomeshhenii // Perspektivy' nauki. – 2023. – 11(170). S. 117-121.

10 Ste'pan D. V. Povy'shenie e'ffektivnosti e'nergosberezheniya izolirovannogo ob'ekta (na primere kampusa Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta) / D. V. Ste'pan // Zhurn. Sib. feder. un-ta. Texnika i texnologii. – 2024. – 17(2). S. 193–204.

11 Kuz'menko V.P., Soleny'j S.V. Model' prediktivnogo obsluzhivaniya dlya upravleniya kachestvom setej svetodiodnogo osveshheniya // Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova. 2023. T. 21. №3. S. 155-169.

12 Kurochkina, V. A. Svetovoe zagryaznenie kak faktor vliyaniya na cheloveka i okruzhayushhuyu sredu / V. A. Kurochkina, A. E. Zhiryakova // Vestnik evrazijskoj nauki. — 2022. — T. 14. — № 1. 17 s.

13 Vasil'eva I.E. Algoritm vy'bora istochnikov sveta v processe proektirovaniya svetodiodny'x sistem osveshheniya maly'x pomeshhenij voennogo naznacheniya //Vestnik Koncerna VKO «Almaz-Antej». – 2022. – 4. S. 91-100.

14 Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registraciiprogrammy' dlya E'VM № 2022614115 Rossijskaya Federaciya. Programma ranzhirovaniya mnogoparametricheskix e'lementov v sootvetstvii s pred'yavlyayemymi chastny'mi trebovaniyam : № 2022611739 : data gosudarstvennoj registraci 17.03.2022 / Vasil'eva I.E., Sajbel' A.G.

Vasilieva Irina Evgenievna

Joint Stock Company “North-West Regional Center of Concern VKO Almaz-Antey - Obukhov Plant”; Candidate of Technical Sciences, Leading Design Engineer;
192012, St. Petersburg, Obukhov Defense Ave. 120, str. 19, room. 1-H;
office tel. (812) 363-95-63;
mobile tel. 911-299-7000;
vasilevagoz@mail.ru

Saibel Alexey Gennadievich

Joint Stock Company “North-West Regional Center of Concern VKO Almaz-Antey - Obukhov Plant”; Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Scientific and Educational Center; 192012, St. Petersburg, Obukhov Defense Ave. 120, pg. 19, room. 1-H;
mobile tel. 921-744-3756;
a.saybel@goz.ru

© Васильева И.Е., Сайбел А.Г., 2025

ШУПЛЕЦОВ В.В.

ОБЗОР ТЕХНИЧЕСКИХ РЕАЛИЗАЦИЙ И АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ИШЕМИЧЕСКИХ ПОВРЕЖДЕНИЙ

Аннотация. В статье представлен обзор применения гиперспектральной визуализации (ГВ) для диагностики ишемических повреждений биологических тканей. Рассматриваются технические реализации систем ГВ для лабораторных исследований на животных и интраоперационного использования, демонстрируя их высокую эффективность для неинвазивной оценки оксигенации и перфузии. Особое внимание уделено возможностям метода в сочетании с алгоритмами машинного обучения для оценки ишемии кишечной стенки. Проведенный анализ подтверждает, что ГВ является высокоточным и объективным инструментом для выявления зон ишемии.

Ключевые слова: гиперспектральная визуализация, диффузно отраженный свет, алгоритмы машинного обучения, нейронные сети, ишемические повреждения тканей, ишемия кишечной стенки.

Введение

ГВ является оптическим методом, основанным на регистрации диффузно отраженного света, который позволяет анализировать пространственное распределение спектральной информации об объекте исследования. В отличие от обычной цветной съемки (RGB), предоставляющей информацию в трех спектральных диапазонах, гиперспектральный подход реализует измерения серии изображений от одного объекта на различных длинах волн, объединенных в трехмерный куб с осями x и y (пространственные координаты) и λ (длина волны) [1-3]. В результате, для каждой точки изображения (каждого пикселя) формируется спектр диффузного отражения, характеризующий поглощение и рассеяние света тканями во всем доступном диапазоне длин волн. Такие биомедицинские системы ГВ обычно используют широкий спектральный диапазон от видимого до ближнего инфракрасного, чтобы определить различия в оптических свойствах биологических тканей. При этом, большая часть научных исследований, посвященных применению ГВ для изучения ишемических повреждений, основаны либо на разработке лабораторных систем для изучения модельных животных, либо на разработке интраоперационных систем, применяемых непосредственно во время операций на пациентах [4]. При реализации лабораторных технических решений зачастую используют либо гиперспектральные детекторы в диапазонах 400-1000 нм и 900-1700 нм, либо коммерчески доступные решения, такие как TIVITA (Diaspective Vision GmbH, Германия) или Specim IQ (Specim, Spectral Imaging Ltd., Финляндия), устанавливаемые на регулируемые штативы или под стереотаксические станки для обеспечения стабильного позиционирования над операционным полем. Такие системы позволяют количественно оценивать параметры оксигенации, перфузии и содержание разных форм гемоглобина практически в режиме реального времени, что совместно с калибровкой гиперспектральных систем с помощью оптических фантомов [5], позволяет перейти к конкретным объективным критериям. Для обработки данных обычно применяются линейные математические алгоритмы, либо методы машинного или глубокого обучения, обеспечивающие диагностическую точность определения ишемических зон до 90%.

Реализация систем ГВ для лабораторных исследований

При реализации ГВ для лабораторных исследований на животных широко применяется гиперспектральная система TIVITA (Diaspective Vision GmbH, Германия), о чем показано в серии работ под авторством Felli E., демонстрирующих оценку ишемии печени на свиньях. В исследовании 2019 года данного автора используемая система зафиксировала значимое снижение сатурации при ишемии (с 42% до 20%) и перфузии (с 43% до 0%), что коррелировало также с ростом лактата в тканях [6]. В работе 2020 года, уже на шести свиньях, также система достоверно дифференцировала тотальную ишемию от артериальной, выявив сильную корреляцию перфузии с капиллярным лактатом и гистопатологическими изменениями [7]. Для

определения ишемических повреждений печени также достаточно эффективно может применяться гиперспектральная система HYPER (Diaspective Vision GmbH, Германия), что показано в исследовании *Urade T.*, выявляя значимое снижение перфузии в ишемизированной доле (0,27% в сравнении с 58,60%) и корреляцию с метаболическими маркерами [8]. Также известна лабораторная гиперспектральная система видимого диапазона (500-600 нм), регистрирующая спектры отражения от кожи задней лапы свиней для диагностики геморрагического шока, что представлено работе под авторством *Cancio L.* [9]. Реализованная система вычисляла сатурацию кислорода через линейную регрессию к спектрам окси- и дезоксигемоглобина. Для решения схожих задач, по мониторингу перфузии и оксигенации тканей после микрохирургического анастомоза, достаточно успешно может применяться вышеупомянутая система TIVITA (Diaspective Vision GmbH, Германия), о чем свидетельствует работа *Grambow E.* [10]. Вычисленные параметры кровотока и насыщения кислородом тканей позволили достоверно выявить снижение перфузии при ишемии.

Также исследователями широко применяются ГВ ИК диапазона, комбинируя их с видимым диапазоном излучения, что представлено в исследовании *Akbari H.* [11], либо анализируя широкий спектр инфракрасного излучения (1000-2350 нм), о чем свидетельствует работа под авторством *Chihara H.* [12]. В исследование *Akbari H.* продемонстрирована возможность обнаруживать сосуды и дифференцировать артерии/вены во время абдоминальных операций, что совместно с методами машинного обучения (методом опорных векторов) позволяет достигнуть высоких показателей точности. В исследовании *Chihara H.* ГВ применялась для *in vivo* обнаружения атеросклеротических бляшек с точностью 82,7%, подтвержденной гистологией. Известны работы, в которых реализованные лабораторные системы апробируются на достаточно больших выборках животных, как, например, в исследовании *Fu C.*, где на 42 крысах продемонстрирована возможность детектировать церебральную ишемию уже через 1 час после окклюзии артерии [13], или как в исследовании под авторством *Egen L.*, где на 73 свиньях определяли снижение оксигенации и перфузии в почках при высоком внутрипочечном давлении [14].

Реализация систем ГВ для интраоперационных применений

Говоря об интраоперационном применение гиперспектральных систем для выявления ишемических повреждений тканей, в основном используются TIVITA (Diaspective Vision GmbH, Германия), OxyVu (Hypermed Medical Imaging, США) или HyperView (BaySpec Inc., США), но в некоторых статьях упоминаются и собственные технические реализации, монтируемые к хирургическим осветителям через стерильные адаптеры или устанавливаемые на мобильные медицинские стойки для позиционирования над операционным полем на расстоянии ~30-50 см. Так, можно выделить серию работ по применению системы OxyVu (Hypermed Medical Imaging, США) для анализа периферической артериальной болезни. Исследование под авторством *Chin J.*, выполненное на 111 пациентах, свидетельствует о снижение концентрации дезоксигемоглобина в стопных ангиосомах, что коррелирует с тяжестью периферической артериальной болезни [15]. Другое исследование, опубликованное автором *Sumpio B.* приводит доказательную базу по применению вышеобозначеной системы для оценки эндотелиальной дисфункции [16]. А работа *Chiang N.* на 294 пациентах показала высокую надежность данной гиперспектральной системы и значимые корреляции сатурации с температурой кожи ($R=0,56$), утвердив метод как перспективный для скрининга периферической артериальной болезни [17].

Достаточно эффективно интраоперационные гиперспектральные системы применяются для мониторинга эндоваскулярного лечения, чему посвящена публикация под авторством *Grambow E.* Данное исследование, проведенное на 37 пациентах с использованием системы TIVITA, подтвердило эффективность гиперспектрального подхода для мониторинга микроциркуляции после реваскуляризации [18]. Известны несколько публикаций с применением системой HyperView (BaySpec Inc., США), для исследования вышеобозначеной проблемы. Так, работа под авторством *Ma K.*, проведённая на 34 пациентах, показала, что снижение уровня дезоксигемоглобина является наиболее чувствительным маркером улучшения перфузии уже на 7-й день после эндоваскулярного лечения, что, по заявлению

самых авторов, позволяет использовать ГВ для домашнего мониторинга [19]. Продолжая исследования в этом направлении, было опубликовано исследование *Kleiss S.*, проведенное на 23 пациентах, с комбинированным применением HyperView (BaySpec Inc., США) и тепловизионной съемки, что позволило сделать вывод о роли дезоксигемоглобина, как маркера клинического улучшения через 6 недель с чувствительностью 62-77% и специфичностью 75-88%, превосходя традиционные ангиографические методы [20].

Для интраоперационной оценки перфузии печени и желудка эффективно применяется система TIVITA (Diaspective Vision GmbH, Германия), что подтверждается рядом публикаций нескольких научных коллективов. Так, работа под авторством *Köhler H.* показывает возможность гиперспектрального подхода к измерению параметров перфузии и насыщения тканей кислородом в зоне анастомоза, что позволило выявить преимущества ишемического прекондиционирования и корреляцию низкой оксигенации с риском несостоятельности швов [21]. В продолжение данного направления коллектив под авторством *Moulla Y.* применили ту же систему во время панкреатодуоденэктомии для мониторинга перфузии печени и желудка до и после клипирования артерии, выявив критическое снижение оксигенации у пациентов со стенозом чревного ствола [22]. При этом такой подход возможен и к применению во время крупных резекций печени, для интраоперационного измерения параметров перфузии, о чем свидетельствует опубликованная работа *Felli E.*, подтвердившая потенциал ГВ для прогнозирования послеоперационных исходов непосредственно во время операции [23].

Также известны применения гиперспектральной системы TIVITA (Diaspective Vision GmbH, Германия) в реконструктивной хирургии для интра- и послеоперационного мониторинга перфузии свободных и ножевых лоскутов, при этом алгоритмы анализа основывались на спектральных характеристиках тканей без использования машинного обучения [24]. Кроме этого, система TIVITA (Diaspective Vision GmbH, Германия) достаточно эффективно применялась при трансплантатах почек, о чем написано в исследовании под авторством *Sucher R.*, которое продемонстрировало, что снижение оксигенации и перфузии через 15 минут после реперфузии точно предсказывает отсроченную функцию трансплантата, а также выявило градиент перфузии мочеточника [25]. При этом более позднее исследование *Studier-Fischer A.* подтверждает роль ГВ как инструмента для интраоперационной оценки жизнеспособности почек, демонстрируя что сочетания данной системы с машинным обучением позволяет достигнуть точности 97,8% в классификации состояний перфузии почки [26].

Реализация систем ГВ для оценки ишемических повреждений ткани кишечной стенки

Отдельно следует рассмотреть научные исследования, посвященные применению ГВ для оценки ишемических повреждений ткани кишечной стенки, как одного из наиболее актуальных направлений по применению гиперспектрального подхода, пример результатов которого представлен на рисунке 1 [28-29].

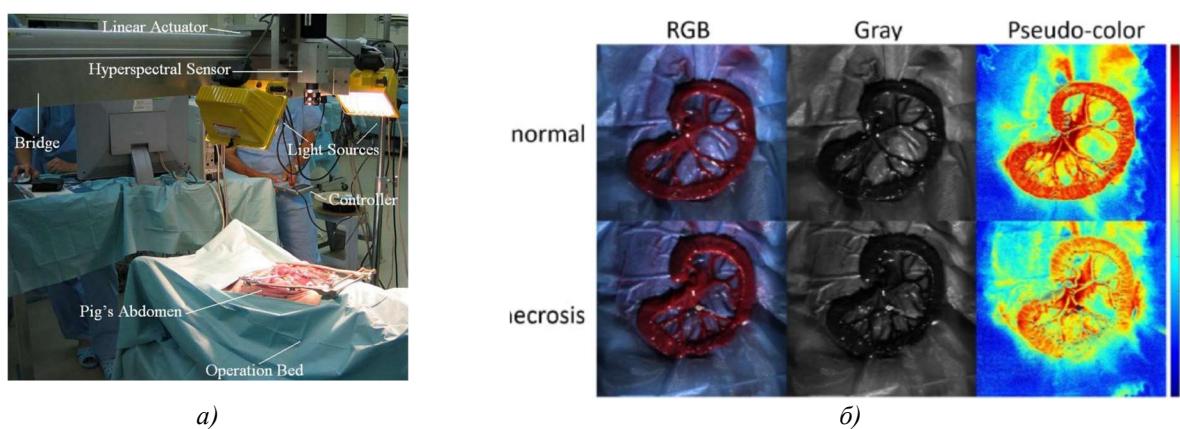


Рисунок 1 – Применение системы гиперспектральной визуализации в хирургическом кабинете (а), диагностические карты ишемизированного кишечника (б) [28,29]

В этом направлении известна серия работ под авторством *Akbari H.*, по выявлению ишемии кишечника у модельных животных, в которых гиперспектральная система реализована с использованием камеры ImSpector N17E (Specim, Spectral Imaging Ltd., Финляндия). В первом исследовании авторами применялось вейвлет-сжатие и метод опорных векторов, что позволило достичь низких показателей ошибок ($FPR=2,3\%$, $FNR=9,7\%$) и достаточно эффективно сегментировать зоны ишемии кишечника [27]. Затем этим же коллективом авторов продемонстрировано интраоперационное выявление ишемии кишечника, с использованием ГВ из двух камер (видимый диапазон 400-1000 нм и ближний ИК-диапазон 900-1700 нм), которая позволила идентифицировать ключевые спектральные зоны (765-830 нм и 999-1182 нм) и разработать специализированные фильтры, показавшие высокую точность исследования [28]. Известно исследование, опубликованное *Zhou Y.*, рассматривающее применение реализованной гиперспектральной системы видимого диапазона с расчетом показателя сатурации в тканях тонкого кишечника на основе линейного преобразования спектров с использованием изобестических точек (500, 544, 797 нм) [29]. Метод выявил значимое снижение оксигенации при ишемии (49,6% против 70,0% в норме) и позволил визуализировать патологические зоны на псевдоцветных картах без применения машинного обучения. Также для решения обозначенной задачи достаточно эффективно может применяться система TIVITA (Diaspective Vision GmbH, Германия), позволяющая достоверно выявлять значимые различия в параметрах перфузии и оксигенации между условно- здоровыми и ишемизированными участками, что рассмотрено в исследовании под авторством *Mehdor M.* [30]. Для увеличения точности классификации типов ткани возможно развитие методов классического анализа в сторону применения более сложного математического анализа или методов глубокого обучения. Так, в работе *Peng C.*, совместно с реализованной гиперспектральной системой применялся метод мультивариативного спектрального анализа, что позволило идентифицировать спектральные маркеры некроза (560, 660, 760 нм) и отследить динамику прогрессирования ишемии в течение 90 минут [31]. Также исследование *Zhang L.* продемонстрировало применение ГВ в сочетании с глубоким обучением (3D-CNN) на кроликах, достигнув высоких показателей точности 89,6%, подчеркивая тем самым необходимость перехода от классических методов анализа к применению методов продвинутой обработки [32].

Заключение

Резюмируя вышеизложенный анализ применения гиперспектральных технологий при изучении ишемических повреждений можно сделать вывод о том, что для лабораторных исследований научными группами применяются либо гиперспектральные детекторы в диапазонах 400-1000 нм (видимый и ближний ИК) и 900-1700 нм (коротковолновый ИК), устанавливаемые на регулируемые штативы или под стереотаксические станки для обеспечения стабильного позиционирования над операционным полем, либо готовые технические решения, такие как TIVITA (Diaspective Vision GmbH, Германия). В исследованиях с интраоперационным применением ГВ большинство работ описывает применение уже упомянутых технических решений, такие как TIVITA (Diaspective Vision GmbH, Германия), HyperView (BaySpec Inc., США) и OxyVu (Hypermed Medical Imaging, США), имеющие в своей конструкции мобильные медицинские штативы, позволяющие проводить неинвазивный мониторинг параметров оксигенации и перфузии непосредственно во время операций. Некоторые из технических решений, в виде условных схем и фотографий установок, представлены на рисунке 2 [8,11,17]. Также по вышеизложенному анализу технических реализаций и применений гиперспектральных систем при анализе ишемических повреждений была синтезирована сводная таблица 1 точностных характеристик (чувствительность, специфичность и точность) по научным публикациям, в которых эти характеристики непосредственно рассчитаны и представлены.

Анализ таблицы точностных характеристик применения ГВ для оценки ишемических повреждений показывает, что средние значения метрик составляют: чувствительность ~77%, специфичность ~88% и точность ~90%. Наименьшее значение точности зафиксировано в работе *Chihara* (2016) [10] – 82,7%, что может быть связано с особенностями

экспериментальных условий и сложностью детекции ранних стадий ишемии. Однако, общая высокая специфичность (до 99,85% у *Zhang* (2023)) [30] и точность (до 97,8% у *Studier-Fischer* (2024)) [24] подтверждают эффективность ГВ для выявления ишемических повреждений, однако вариабельность чувствительности указывает на необходимость оптимизации методов анализа для разных типов тканей.

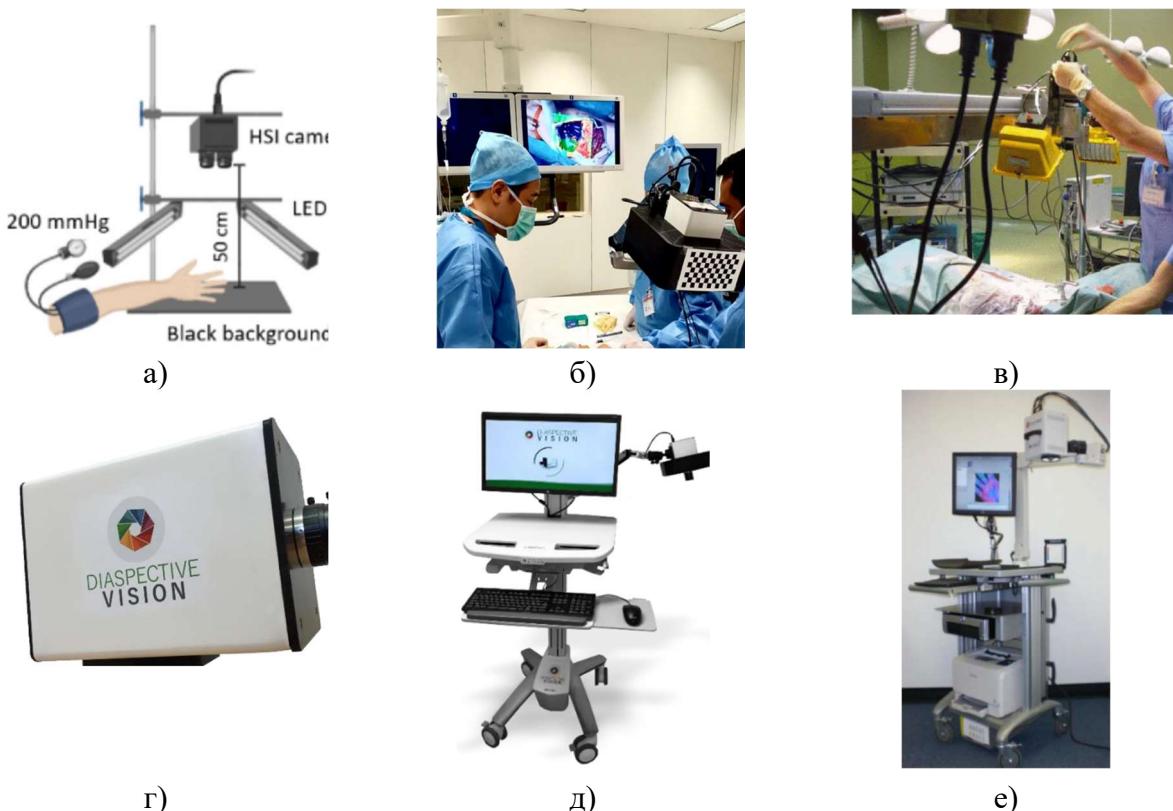


Рисунок 2 – Варианты технической реализации гиперспектральных систем при исследовании ишемических повреждений: для лабораторных исследований (а), для интраоперационных исследований (б, в), коммерческая система TIVITA для микроскопических исследований (г), коммерческая система TIVITA для интраоперационных исследований (д), коммерческая система OxyVu для интраоперационных исследований (е) [8,11,17]

Таблица 1 – Сводные данные точностных характеристик по применению ГВ в исследованиях ишемических повреждений

Выходные данные исследования	Чувствительность, %	Специфичность, %	Точность, %
Chihara H. et al. 2016	81,4	83,6	82,7
Kleiss S. F. et al. 2023	62–77	75–88	–
Kounas K. 2023	–	–	94
Studier-Fischer A. et al. 2024	–	–	97,8
Zhang L. et al. 2023	81,93	99,85	89,60

Проведенный анализ литературных данных подтверждает высокую эффективность ГВ для диагностики ишемических повреждений, при этом технические реализации таких систем варьируются от лабораторных установок до коммерческих интраоперационных систем, позволяющих в реальном времени оценивать параметры оксигенации и перфузии тканей. Метод демонстрирует стабильно высокие показатели специфичности (~88%) и точности (~97%), что делает его надежным инструментом для выявления характерных зон ишемии. Особую значимость имеет успешное применение ГВ для интраоперационной оценки жизнеспособности кишечной стенки, где использование

спектральных индексов и методов глубокого обучения позволяет достигать точности свыше 90%.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 25-25-00482, [https://rscf.ru/en/project/ 25-25-00482](https://rscf.ru/en/project/25-25-00482).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Manley, M. Near-infrared spectroscopy and hyperspectral imaging: non-destructive analysis of biological materials / M. Manley // Chemical Society Reviews. – 2014. – Vol. 43. – №. 24. – P. 8200–8214
2. Zherebtsov, E. Hyperspectral imaging of human skin aided by artificial neural networks / E. Zherebtsov, V. Dremin, A. Popov, A. Doronin, D. Kurakina, M. Kirillin, A. Bykov // Biomedical optics express. - 2019. Vol. 10, №7. – P. 3545-3559.
3. Dremin, V. Skin complications of diabetes mellitus revealed by polarized hyperspectral imaging and machine learning / V. Dremin, Z. Marcinkevics, E.Zherebtsov, A. Popov, A. Grabovskis, H. Kronberga, A. Bykov // IEEE Transactions on Medical Imaging. – 2021. – Vol. 40, № 4. – P. 1207-1216.
4. Адаменков, Н.А. Возможность метода гиперспектральной визуализации для определения жизнеспособности кишечника при моделировании локальной ишемии / Н.А. Адаменков, В.В. Шуплецов, И.А. Горюнов, А.А. Палалов, Е.Г. Чугунова, Н.И. Калуга, А.В. Мамошин, В.В. Дрёмин // Медицинская техника. – 2023. – Т. 2. – С. 17-18
5. Шуплецов, В.В. Использование модельных образцов кожи человека на основе поликариламида в задачах гиперспектральной флуоресцентной визуализации и спектроскопии / В.В. Шуплецов, Е.А. Жеребцов, В.В. Дрёмин., А.П. Попов., А.В. Быков, Е.В. Потапова, А.В. Дунаев, И.В. Меглинский // Квантовая Электроника. – 2021. – Т. 51, № 2. – С. 118-123.
6. Felli, E. Hyperspectral imaging of pig liver ischemia: a proof of concept / E. Felli, T. Urade, M. Barberio, E. Felli, M. Diana // Show Chwan Medical Journal. – 2019. – Vol. 18. – №. 2. – P. 117–121.
7. Felli, E. Hyperspectral evaluation of hepatic oxygenation in a model of total vs. arterial liver ischaemia / E. Felli, M. Al-Taher, T. Collins, A. Baiocchini, E. Felli, M. Barberio, G.M. Ettorre, D. Mutter, V. Lindner, A. Hostettler, S. Gioux, C. Schuster, J. Marescaux, M. Diana // Scientific Reports. – 2020. – Vol. 10. – №. 1. – Article No. 15441
8. Urade, T. Hyperspectral enhanced reality (HYPER) for anatomical liver resection / T. Urade, E. Felli, M. Barberio, M. Al-Taher, E. Felli, L. Goffin, V. Agnus, G.M. Ettorre, J. Marescaux, D. Mutter, M. Diana // Surgical Endoscopy. – 2021. – Vol. 35. – №. 4. – P. 1844–1850.
9. Cancio, L.C. Hyperspectral imaging: a new approach to the diagnosis of hemorrhagic shock / L.C. Cancio, A.I. Batchinsky, J.R. Mansfield, S. Panasyuk, K. Hetz, D. Martini, B.S. Jordan, B. Tracey, J.E. Freeman // Journal of Trauma and Acute Care Surgery. – 2006. – Vol. 60. – №. 5. – P. 1087–1095.
10. Grambow, E. Hyperspectral imaging for monitoring of perfusion failure upon microvascular anastomosis in the rat hind limb / E. Grambow, M. Dau, A. Holmer, V. Lipp, B. Frerich, E. Klar, B. Vollmar, P.W. Kämmerer // Microvascular Research. – 2018. – Vol. 116. – P. 64–70.
11. Akbari, H. Blood vessel detection and artery–vein differentiation using hyperspectral imaging / H. Akbari, Y. Kosugi, K. Kojima, N. Tanaka // 2009 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. – IEEE, 2009. – P. 1461–1464.
12. Chihara, H. In vivo detection of atherosclerotic plaque using non-contact and label-free near-infrared hyperspectral imaging / H. Chihara, N. Oishi, A. Ishii, T. Munemitsu, D. Arai, H. Ikeda, S. Miyamoto // Atherosclerosis. – 2016. – Vol. 250. – P. 106–113.
13. Fu, C. Rapid, label-free detection of cerebral ischemia in rats using hyperspectral imaging / C. Fu, K. Ma, Z. Li, H. Wang, T. Chen, D. Zhang, S. Wang, N. Mu, C. Yang, L. Zhao, S. Gong, H. Feng, F. Li // Journal of Neuroscience Methods. – 2020. – Vol. 329. – Article No. 108466
14. Egen, L. Hyperspectral Imaging Accurately Detects Renal Malperfusion Due to High Intrarenal Pressure / L. Egen, M. Hommel, C.M. Haney, B. Özdemir, S. Knoedler, J. Sellner, S. Seidlitz, M. Dietrich, G.A. Salg, F. Nickel, L. Maier-Hein, M.S. Michel, A. Studier-Fischer, K.F. Kowalewski // European Urology Open Science. – 2025. – Vol. 78. – P. 16–27.
15. Chin, J.A. Evaluation of hyperspectral technology for assessing the presence and severity of peripheral artery disease / J.A. Chin, E.C. Wang, M.R. Kibbe // Journal of Vascular Surgery. – 2011. – Vol. 54. – №. 6. – P. 1679–1688
16. Sumpio, B.J. Use of hyperspectral imaging to assess endothelial dysfunction in peripheral arterial disease / B.J. Sumpio, G. Citoni, J.A. Chin, B.E. Sumpio // Journal of Vascular Surgery. – 2016. – Vol. 64. – №. 4. – P. 1066–1073
17. Chiang, N. Evaluation of hyperspectral imaging technology in patients with peripheral vascular disease / N. Chiang, J.K. Jain, J. Sleigh, T. Vasudevan // Journal of Vascular Surgery. – 2017. – Vol. 66. – №. 4. – P. 1192–1201.
18. Grambow, E. Evaluation of hyperspectral imaging for follow-up assessment after revascularization in peripheral artery disease / E. Grambow, N.A. Sandkühler, J. Groß, D.G.E. Thiem, M. Dau, M. Leuchter, M. Weinrich // Journal of Clinical Medicine. – 2022. – Vol. 11. – №. 3. – Article No. 758.
19. Ma, K.F. Determination of changes in tissue perfusion at home with hyperspectral and thermal imaging in the first six weeks after endovascular therapy in patients with peripheral arterial disease / K.F. Ma, T.S. Nijboer, S.F. Kleiss, M. El Moumni, R.P.H. Bokkers, R.C.L. Schuurmann, J.P.M. de Vries // Diagnostics. – 2022. – Vol. 12. – №. 10.

– Article No. 2489.

20. Kleiss, S.F. Detecting changes in tissue perfusion with hyperspectral imaging and thermal imaging following endovascular treatment for peripheral arterial disease / S.F. Kleiss, K.F. Ma, M. El Moumni, Ç. Ünlü, T.S. Nijboer, R.C.L. Schuurmann, R.P.H. Bokkers, J.P.M. de Vries // Journal of Endovascular Therapy. – 2023. – Vol. 30. – №. 3. – P. 382–392.

21. Köhler, H. Evaluation of hyperspectral imaging (HSI) for the measurement of ischemic conditioning effects of the gastric conduit during esophagectomy / H. Köhler, B. Jansen-Winkel, M. Maktabi, M. Barberio, J. Takoh, N. Holfert, Y. Moulla, S. Niebisch, M. Diana, T. Neumuth, S.M. Rabe, C. Chalopin, A. Melzer, I. Gockel // Surgical Endoscopy. – 2019. – Vol. 33. – №. 11. – P. 3775–3782.

22. Moulla, Y. Hyperspectral Imaging (HSI)—a new tool to estimate the perfusion of upper abdominal organs during pancreateoduodenectomy / Y. Moulla, D.C. Buchloh, H. Köhler, S. Rademacher, T. Denecke, H.J. Meyer, M. Mehdorn, U.G. Lange, R. Sucher, D. Seehofer, B. Jansen-Winkel, I. Gockel // Cancers. – 2021. – Vol. 13. – №. 11. – Article No. 2846.

23. Felli, E. Hyperspectral imaging in major hepatectomies: preliminary results from the ex-machina trial / E. Felli, L. Cinelli, E. Bannone, F. Giannone, E.M. Muttillo, M. Barberio, D.S. Keller, M.R. Rodríguez-Luna, N. Okamoto, T. Collins, A. Hostettler, C. Schuster, D. Mutter, P. Pessaux, J. Marescaux, S. Gioux, E. Felli, M. Diana // Cancers. – 2022. – Vol. 14. – №. 22. – Article No. 5591.

24. Thiem, D.G.E. Hyperspectral analysis for perioperative perfusion monitoring—a clinical feasibility study on free and pedicled flaps / D.G.E. Thiem, R.W. Frick, E. Goetze, M. Gielisch, B. Al-Nawas, P.W. Kämmerer // Clinical Oral Investigations. – 2021. – Vol. 25. – №. 3. – P. 933–945.

25. Sucher, R. Hyperspectral imaging (HSI) of human kidney allografts / R. Sucher, T. Wagner, H. Köhler, E. Sucher, H. Quice, S. Recknagel, A. Lederer, H.M. Hau, S. Rademacher, S. Schneeberger, G. Brandacher, I. Gockel, D. Seehofer // Annals of Surgery. – 2022. – Vol. 276. – №. 1. – P. e48–e55.

26. Studier-Fischer, A. Spectral characterization of intraoperative renal perfusion using hyperspectral imaging and artificial intelligence / A. Studier-Fischer, M. Bressan, A.B. Qasim, B. Özdemir, J. Sellner, S. Seidlitz, C.M. Haney, L. Egen, M. Michel, M. Dietrich, G.A. Salg, F. Billmann, H. Nienhüser, T. Hackert, B.P. Müller, L. Maier-Hein, F. Nickel, K.F. Kowalewski // Scientific Reports. – 2024. – Vol. 14. – №. 1. – Article No. 17262.

27. Akbari, H. Hyperspectral imaging and diagnosis of intestinal ischemia / H. Akbari, Y. Kosugi, K. Kojima, N. Tanaka // 2008 30th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. – IEEE, 2008. – P. 1238–1241.

28. Akbari, H. Detection and analysis of the intestinal ischemia using visible and invisible hyperspectral imaging / H. Akbari, Y. Kosugi, K. Kojima, N. Tanaka // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 2010. – Vol. 57. – №. 8. – P. 2011–2017.

29. Zhou, Y. Hyperspectral imaging combined with blood oxygen saturation for in vivo analysis of small intestinal necrosis tissue / Y. Zhou, L. Zhang, D. Huang, Y. Zhang, L. Zhu, X. Chen, G. Cui, Q. Chen, X. Chen, S. Ali // Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. – 2024. – Vol. 315. – Article No. 124298.

30. Mehdorn, M. Hyperspectral imaging (HSI) in acute mesenteric ischemia to detect intestinal perfusion deficits / M. Mehdorn, H. Köhler, S.M. Rabe, S. Niebisch, O. Lyros, C. Chalopin, I. Gockel, B. Jansen-Winkel // Journal of Surgical Research. – 2020. – Vol. 254. – P. 7–15.

31. Peng, C. Analysis of ischemic intestinal tissue composition based on visible and near-infrared reflectance hyperspectral imaging and multivariate curve resolution / C. Peng, X. Chen, L. Zhu, A. de Juan, R. Tauler // Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. – 2025. – Vol. 346. – Article No. 126841.

32. Zhang, L. Hyperspectral Imaging Combined with Deep Learning to Detect Ischemic Necrosis in Small Intestinal Tissue / L. Zhang, Y. Zhou, D. Huang, L. Zhu, X. Chen, Z. Xie, G. Cui, G. Huang, S. Ali, X. Chen // Photonics. – Vol. 10. – №. 7. – Article No. 708.

Шуплецов Валерий Витальевич

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

Ассистент кафедры приборостроения, метрологии и сертификации, стажер-исследователь научно-технологического центра биомедицинской фотоники
302020, г. Орел, Наугорское ш, 29

E-mail: valery.shupletsov@bmccenter.ru

SHUPLETSOV V.V.

A REVIEW OF TECHNICAL IMPLEMENTATIONS AND DATA PROCESSING ALGORITHMS FOR HYPERSPECTRAL MEASUREMENTS IN THE STUDY OF ISCHEMIC INJURIES

Abstract. This article provides a review of the application of hyperspectral imaging (HSI) for the diagnosis of ischemic injuries in biological tissues. It examines the technical implementations of HSI systems for laboratory research

on animals and for intraoperative use, demonstrating their high efficacy for the non-invasive assessment of oxygenation and perfusion. Particular attention is given to the potential of the method when combined with machine learning algorithms for assessing intestinal wall ischemia, with an accuracy exceeding 90%. The conducted analysis confirms that HSI is a highly precise and objective tool for identifying areas of ischemia.

Keywords: hyperspectral imaging, diffusely reflected light, machine learning algorithms, neural networks, tissue ischemic injuries, intestinal wall ischemia.

BIBLIOGRAPHY

1. Manley, M. Near-infrared spectroscopy and hyperspectral imaging: non-destructive analysis of biological materials / M. Manley // Chemical Society Reviews. – 2014. – Vol. 43. – №. 24. – P. 8200–8214
2. Zhrebtssov, E. Hyperspectral imaging of human skin aided by artificial neural networks / E. Zhrebtssov, V. Dremin, A. Popov, A. Doronin, D. Kurakina, M. Kirillin, A. Bykov // Biomedical optics express. - 2019. Vol. 10, №7. – P. 3545-3559.
3. Dremin, V. Skin complications of diabetes mellitus revealed by polarized hyperspectral imaging and machine learning / V. Dremin, Z. Marcinkevics, E.Zherebtsov, A. Popov, A. Grabovskis, H. Kronberga, A. Bykov // IEEE Transactions on Medical Imaging. – 2021. – Vol. 40, № 4. – P. 1207-1216.
4. Adamenkov, N.A. The Potential of the Hyperspectral Imaging Method for Determining Intestinal Viability in a Model of Local Ischemia / N.A. Adamenkov, V.V. Shupletsov, I.A. Goryunov, A.A. Palalov, E.G. Chugunova, N.I. Kaluga, A.V. Mamoshin, V.V. Dremin // Medical Engineering. – 2023. – Vol. 2. – P. 17-18.
5. Shupletsov, V.V. Polyacrylamide-based phantoms of human skin for hyperspectral fluorescence imaging and spectroscopy / V.V. Shupletsov, E.A. Zhrebtssov, V.V. Dremin, A.P. Popov, A.V. Bykov, E.V. Potapova, A.V. Dunaev, I.V. Meglinski // Quantum Electronics. – 2021. – Vol. 51, No. 2. – P. 118-123.
6. Felli, E. Hyperspectral imaging of pig liver ischemia: a proof of concept / E. Felli, T. Urade, M. Barberio, E. Felli, M. Diana // Show Chwan Medical Journal. – 2019. – Vol. 18. – №. 2. – P. 117–121.
7. Felli, E. Hyperspectral evaluation of hepatic oxygenation in a model of total vs. arterial liver ischaemia / E. Felli, M. Al-Taher, T. Collins, A. Baiocchini, E. Felli, M. Barberio, G.M. Ettorre, D. Mutter, V. Lindner, A. Hostettler, S. Gioux, C. Schuster, J. Marescaux, M. Diana // Scientific Reports. – 2020. – Vol. 10. – №. 1. – Article No. 15441
8. Urade, T. Hyperspectral enhanced reality (HYPER) for anatomical liver resection / T. Urade, E. Felli, M. Barberio, M. Al-Taher, E. Felli, L. Goffin, V. Agnus, G.M. Ettorre, J. Marescaux, D. Mutter, M. Diana // Surgical Endoscopy. – 2021. – Vol. 35. – №. 4. – P. 1844–1850.
9. Cancio, L.C. Hyperspectral imaging: a new approach to the diagnosis of hemorrhagic shock / L.C. Cancio, A.I. Batchinsky, J.R. Mansfield, S. Panasyuk, K. Hetz, D. Martini, B.S. Jordan, B. Tracey, J.E. Freeman // Journal of Trauma and Acute Care Surgery. – 2006. – Vol. 60. – №. 5. – P. 1087–1095.
10. Grambow, E. Hyperspectral imaging for monitoring of perfusion failure upon microvascular anastomosis in the rat hind limb / E. Grambow, M. Dau, A. Holmer, V. Lipp, B. Frerich, E. Klar, B. Vollmar, P.W. Kämmerer // Microvascular Research. – 2018. – Vol. 116. – P. 64–70.
11. Akbari, H. Blood vessel detection and artery–vein differentiation using hyperspectral imaging / H. Akbari, Y. Kosugi, K. Kojima, N. Tanaka // 2009 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. – IEEE, 2009. – P. 1461–1464.
12. Chihara, H. In vivo detection of atherosclerotic plaque using non-contact and label-free near-infrared hyperspectral imaging / H. Chihara, N. Oishi, A. Ishii, T. Munemitsu, D. Arai, H. Ikeda, S. Miyamoto // Atherosclerosis. – 2016. – Vol. 250. – P. 106–113.
13. Fu, C. Rapid, label-free detection of cerebral ischemia in rats using hyperspectral imaging / C. Fu, K. Ma, Z. Li, H. Wang, T. Chen, D. Zhang, S. Wang, N. Mu, C. Yang, L. Zhao, S. Gong, H. Feng, F. Li // Journal of Neuroscience Methods. – 2020. – Vol. 329. – Article No. 108466
14. Egen, L. Hyperspectral Imaging Accurately Detects Renal Malperfusion Due to High Intrarenal Pressure / L. Egen, M. Hommel, C.M. Haney, B. Özdemir, S. Knoedler, J. Sellner, S. Seidlitz, M. Dietrich, G.A. Salg, F. Nickel, L. Maier-Hein, M.S. Michel, A. Studier-Fischer, K.F. Kowalewski // European Urology Open Science. – 2025. – Vol. 78. – P. 16–27.
15. Chin, J.A. Evaluation of hyperspectral technology for assessing the presence and severity of peripheral artery disease / J.A. Chin, E.C. Wang, M.R. Kibbe // Journal of Vascular Surgery. – 2011. – Vol. 54. – №. 6. – P. 1679–1688
16. Sumpio, B.J. Use of hyperspectral imaging to assess endothelial dysfunction in peripheral arterial disease / B.J. Sumpio, G. Citoni, J.A. Chin, B.E. Sumpio // Journal of Vascular Surgery. – 2016. – Vol. 64. – №. 4. – P. 1066–1073
17. Chiang, N. Evaluation of hyperspectral imaging technology in patients with peripheral vascular disease / N. Chiang, J.K. Jain, J. Sleigh, T. Vasudevan // Journal of Vascular Surgery. – 2017. – Vol. 66. – №. 4. – P. 1192–1201.
18. Grambow, E. Evaluation of hyperspectral imaging for follow-up assessment after revascularization in peripheral artery disease / E. Grambow, N.A. Sandkühler, J. Groß, D.G.E. Thiem, M. Dau, M. Leuchter, M. Weinrich // Journal of Clinical Medicine. – 2022. – Vol. 11. – №. 3. – Article No. 758.
19. Ma, K.F. Determination of changes in tissue perfusion at home with hyperspectral and thermal imaging in the first six weeks after endovascular therapy in patients with peripheral arterial disease / K.F. Ma, T.S. Nijboer, S.F. Kleiss, M. El Moumni, R.P.H. Bokkers, R.C.L. Schuurmann, J.P.M. de Vries // Diagnostics. – 2022. – Vol. 12. – №. 10.

– Article No. 2489.

20. Kleiss, S.F. Detecting changes in tissue perfusion with hyperspectral imaging and thermal imaging following endovascular treatment for peripheral arterial disease / S.F. Kleiss, K.F. Ma, M. El Moumni, Ç. Ünlü, T.S. Nijboer, R.C.L. Schuurmann, R.P.H. Bokkers, J.P.M. de Vries // Journal of Endovascular Therapy. – 2023. – Vol. 30. – №. 3. – P. 382–392.

21. Köhler, H. Evaluation of hyperspectral imaging (HSI) for the measurement of ischemic conditioning effects of the gastric conduit during esophagectomy / H. Köhler, B. Jansen-Winkel, M. Maktabi, M. Barberio, J. Takoh, N. Holfert, Y. Moulla, S. Niebisch, M. Diana, T. Neumuth, S.M. Rabe, C. Chalopin, A. Melzer, I. Gockel // Surgical Endoscopy. – 2019. – Vol. 33. – №. 11. – P. 3775–3782.

22. Moulla, Y. Hyperspectral Imaging (HSI)—a new tool to estimate the perfusion of upper abdominal organs during pancreateoduodenectomy / Y. Moulla, D.C. Buchloh, H. Köhler, S. Rademacher, T. Denecke, H.J. Meyer, M. Mehdorn, U.G. Lange, R. Sucher, D. Seehofer, B. Jansen-Winkel, I. Gockel // Cancers. – 2021. – Vol. 13. – №. 11. – Article No. 2846.

23. Felli, E. Hyperspectral imaging in major hepatectomies: preliminary results from the ex-machina trial / E. Felli, L. Cinelli, E. Bannone, F. Giannone, E.M. Muttillo, M. Barberio, D.S. Keller, M.R. Rodríguez-Luna, N. Okamoto, T. Collins, A. Hostettler, C. Schuster, D. Mutter, P. Pessaux, J. Marescaux, S. Gioux, E. Felli, M. Diana // Cancers. – 2022. – Vol. 14. – №. 22. – Article No. 5591.

24. Thiem, D.G.E. Hyperspectral analysis for perioperative perfusion monitoring—a clinical feasibility study on free and pedicled flaps / D.G.E. Thiem, R.W. Frick, E. Goetze, M. Gielisch, B. Al-Nawas, P.W. Kämmerer // Clinical Oral Investigations. – 2021. – Vol. 25. – №. 3. – P. 933–945.

25. Sucher, R. Hyperspectral imaging (HSI) of human kidney allografts / R. Sucher, T. Wagner, H. Köhler, E. Sucher, H. Quice, S. Recknagel, A. Lederer, H.M. Hau, S. Rademacher, S. Schneeberger, G. Brandacher, I. Gockel, D. Seehofer // Annals of Surgery. – 2022. – Vol. 276. – №. 1. – P. e48–e55.

26. Studier-Fischer, A. Spectral characterization of intraoperative renal perfusion using hyperspectral imaging and artificial intelligence / A. Studier-Fischer, M. Bressan, A.B. Qasim, B. Özdemir, J. Sellner, S. Seidlitz, C.M. Haney, L. Egen, M. Michel, M. Dietrich, G.A. Salg, F. Billmann, H. Nienhüser, T. Hackert, B.P. Müller, L. Maier-Hein, F. Nickel, K.F. Kowalewski // Scientific Reports. – 2024. – Vol. 14. – №. 1. – Article No. 17262.

27. Akbari, H. Hyperspectral imaging and diagnosis of intestinal ischemia / H. Akbari, Y. Kosugi, K. Kojima, N. Tanaka // 2008 30th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. – IEEE, 2008. – P. 1238–1241.

28. Akbari, H. Detection and analysis of the intestinal ischemia using visible and invisible hyperspectral imaging / H. Akbari, Y. Kosugi, K. Kojima, N. Tanaka // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 2010. – Vol. 57. – №. 8. – P. 2011–2017.

29. Zhou, Y. Hyperspectral imaging combined with blood oxygen saturation for in vivo analysis of small intestinal necrosis tissue / Y. Zhou, L. Zhang, D. Huang, Y. Zhang, L. Zhu, X. Chen, G. Cui, Q. Chen, X. Chen, S. Ali // Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. – 2024. – Vol. 315. – Article No. 124298.

30. Mehdorn, M. Hyperspectral imaging (HSI) in acute mesenteric ischemia to detect intestinal perfusion deficits / M. Mehdorn, H. Köhler, S.M. Rabe, S. Niebisch, O. Lyros, C. Chalopin, I. Gockel, B. Jansen-Winkel // Journal of Surgical Research. – 2020. – Vol. 254. – P. 7–15.

31. Peng, C. Analysis of ischemic intestinal tissue composition based on visible and near-infrared reflectance hyperspectral imaging and multivariate curve resolution / C. Peng, X. Chen, L. Zhu, A. de Juan, R. Tauler // Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. – 2025. – Vol. 346. – Article No. 126841.

32. Zhang, L. Hyperspectral Imaging Combined with Deep Learning to Detect Ischemic Necrosis in Small Intestinal Tissue / L. Zhang, Y. Zhou, D. Huang, L. Zhu, X. Chen, Z. Xie, G. Cui, G. Huang, S. Ali, X. Chen // Photonics. – Vol. 10. – №. 7. – Article No. 708.

Shupletsov Valery Vitalievich

Orel State University,

Assistant of the Department of Instrumentation, Metrology and Certification, research

assistant of Research & Development Center of Biomedical Photonics

302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29

E-mail: valery.shupletsov@bmccenter.ru

© Шуплецов В.В., 2025

КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА, ИСПЫТАНИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

УДК 005.62:658.562:658.51

DOI: 10.33979/2073-7408-2025-373-5-135-141

КУКУШКИН К.В., МАРТЫНЕЦ Е.Р.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ИНЖИНИРИНГОВОГО ЦЕНТРА

Аннотация. Статья посвящена разработке математической модели оценки качества деятельности инжинирингового центра. Предложена система показателей, которая охватывает ключевые аспекты деятельности центра, такие как процессы, результаты, персонал, управление знаниями, технологическая инфраструктура, маркетинг и финансовая независимость. Модель позволяет оценить качество деятельности центра и выявить области для улучшения.

Ключевые слова: инжиниринговый центр, математическая модель, качество деятельности, система показателей, управление знаниями, технологическая инфраструктура, финансовая независимость.

Введение

Инжиниринговые центры выступают ядром развития современной промышленности и науки. Так, вокруг таких организаций формируются сетевые консорциумы, включающие частный бизнес, научные организации, а также институты развития. Консорциумы успешно реализуют крупные проекты, решая вызовы, существующие для разных отраслей экономики, в первую очередь высокотехнологичной промышленности [1–4].

Ключевую роль играют инжиниринговые центры, сформированные на базе университетов и специализирующиеся на оказании услуг промышленным предприятиям. Именно эти организации создают основу для преодоления перспективными технологиями «долины смерти» [5], а также обеспечивают разработку высокотехнологичной продукции [6].

Инжиниринговые центры на базе вузов не только играют роль центров для проектных консорциумов, но и получают финансирование от государственных органов, заинтересованных в комплексной трансформации промышленности, а также оказывают услуги промышленным предприятиям [7].

Основная часть

Эффективная деятельность инжиниринговых центров и высокий уровень управления качеством этой деятельности являются условиями не только успешности и конкурентоспособности самого инжинирингового центра на рынке, но и одним из факторов динамичного развития технологических рынков и промышленности в целом. Инжиниринговые центры оказывают прямое воздействие на все стадии жизненного цикла изделия [8], особенно процессы производства, поскольку определяют, какими качествами и свойствами будет обладать конечная продукция и какой уровень конкурентоспособности продукта будет обеспечен в разрезе таких факторов, как соответствие выпускаемой продукции требованиям потребителя, соотношение «цена – качество», адаптация к рыночным условиям и др. [9].

Цель исследования – формирование математической модели оценки качества деятельности инжинирингового центра. Для формирования математической модели необходимо определить перечень ключевых показателей качества деятельности инжинирингового центра, специализирующегося на услугах для высокотехнологичной промышленности, а также учесть существующие подходы к классификации.

Одним из принятых методов измерения качества является квалиметрическая оценка, реализуемая через оценку комплексного показателя качества, который используется, например при оценке качества продукции. Проведенный обзор литературы в области оценки деятельности инжиниринговых центров, существующих методик оценки деятельности центров при реализации грантовых программ, а также анализ опыта функционирования Инжинирингового центра СПбПУ позволил выявить ключевые показатели, оценка которых

позволит комплексно, систематизированно и целостно представить эффективность и качество деятельности в области инжиниринга. Предлагаемая классификация показателей качества деятельности инжиниринговых центров обеспечивает учет таких аспектов, как функциональные параметры и назначение деятельности, управленческие и организационно-методические факторы, параметры процесса с учетом используемых ресурсов и результата, что отличает предлагаемую классификацию от существующих.

Целесообразно выделить следующие 7 групп показателей:

1) *Pr (Процесс)*: Группа показателей, характеризующая эффективность основных процессов инжинирингового центра, от привлечения заказчиков до сдачи результатов. Оценивается скорость реализации задач, их качество, соответствие запланированным срокам и бюджетам.

2) *R (Результат)*: Группа показателей, характеризующая итоги (результаты) выполнения задач, в частности, оценивается коммерческая успешность реализуемых проектов, их соответствие ожиданиям и требованиям заказчика, объем выручки.

3) *P (Персонал)*: Группа показателей, характеризующая квалификацию и эффективность работы сотрудников. Одна из ключевых групп показателей деятельности инжинирингового центра, поскольку характеризует профессиональный уровень сотрудников, опыт и вовлеченность в проекты, учитывает показатели мотивации персонала.

4) *KM (Управление знаниями)*: Группа показателей, характеризующая процессы обмена и использования знаний в организации, в том числе сбор, хранение, использование и распространение. Эффективное управление знаниями формирует конкурентные преимущества инжинирингового центра, такие как увеличение скорости реализации проектов, снижение стоимости их реализации, быстрое масштабирование в рамках новых отраслей.

5) *TI (Технологическая инфраструктура)*: Группа показателей, характеризующая материально-техническое обеспечение процесса. Одна из важных групп показателей, включающая аппаратное и программное обеспечение, используемое в деятельности инжинирингового центра, в том числе оценку доступности, надежности, производительности и безопасности используемых ресурсов.

6) *M (Маркетинг)*: Группа показателей, характеризующая эффективность маркетинговой деятельности. Учет маркетинговых показателей позволяет оптимизировать стратегию, повысить эффективность использования бюджета и увеличить поток новых заказов.

7) *FI (Функциональная и финансовая независимость)*: Группа показателей для оценки качества взаимодействия инжинирингового центра с университетом, в частности, оценки эффективности выполнения проектов инжиниринговым центром в структуре университета, эффективности использования ресурсов университета, затраты на организационно-административные процессы, вызванные вхождением в структуру университета и т. п. Анализ этих показателей позволяет выявить факторы, способствующие развитию центра или ограничивающие его, а затем максимизировать влияние положительных факторов и снизить влияние отрицательных факторов на итоговый результат.

Приведенные группы формируют систему показателей качества деятельности инжинирингового центра, что обеспечивается взаимным влиянием показателей друг на друга, а также воздействием на результативность бизнес-процессов инжинирингового центра [10]. Разработанная система показателей качества деятельности инжинирингового центра представлена в таблице 1.

Представленные в таблице показатели могут быть дополнены и уточнены. Показатели имеют различные размеры и требуют свертки: например, показатели доли могут быть переведены в баллы: 20% – 2 балла, 40% – 4 балла и т. д. до 10 баллов; количественные показатели могут быть рассчитаны на период и соотнесены с предыдущими периодами, по результатам чего им также присваиваются баллы; качественные показатели также могут быть оценены экспертными методами с помощью балльной оценки.

Особый интерес вызывает получение интегральной оценки на основе комплексного показателя качества, который может стать основой для математической модели.

Таблица 1 – Система показателей качества деятельности инженерного центра

Показатели процесса	Pr	Показатели результата	R	Показатели персонала	P	Показатели управления знаниями	KM
1	2			3		4	
Доля проектов, выполненных в соответствии с установленными сроками, от общего количества проектов	Pr1	Общее число проектов, успешно завершенных за период оценивания	R1	Наличие у инженеров навыков управления проектами (сертификаты, документы о дополнительном образовании и пр.)	P1	Уровень использования оцифрованных баз данных, доступных для использования в проектах	KM1
Доля загруженности персонала относительно общего рабочего времени	Pr2	Удовлетворенность заказчиков результатами проектов	R2	Наличие опыта работы инженеров в компаниях-представителях целевой отрасли	P2	Доля сотрудников, имеющих доступ к оцифрованным базам знания, относительно общего количества сотрудников	KM2
Среднее количество доработок на один проект	Pr3	Общий доход от реализации проектов (за период оценивания)	R3	Уровень владения стандартами и другими нормативными документами	P3	Доля проектов, в которых использовались полученные в рамках оцифровки данные, относительно общего количества проектов	KM3
Скорость Среднее время доведения проекта от заявки до заключения договора	Pr4	Доля заказчиков, обращающихся с заказом повторно, относительно общего числа заказчиков	R4	Навыки презентации и защиты проектов у проектных менеджеров (опыт проектного управления)	P4	Количество новых методик, подходов, технологий, разработанных на основе научно-технологического задела	KM4
Доля проектов, выполненных в соответствии с запланированным бюджетом, от общего количества проектов	Pr5	Доля отраслей промышленности, в которых выполняются проекты, к количеству потенциальных отраслей	R5	Рост количества студентов, подготовленных целевым образом для работы в центре за период	P5	Уровень структурированности и доступности информации баз данных и научно-технологического задела	KM5
Соотношение внебюджетного и привлеченного бюджетного финансирования	Pr6	Доля выполненных проектов, результаты которых были доведены до запуска продукции в производство, от общего количества выполненных проектов	R6	Уровень удовлетворенности персонала условиями работы	P6	Время, необходимое для адаптации нового сотрудника и освоения им существующих баз данных	KM6
Соотношение выигранных заявок к поданным заявкам инженерного центра	Pr7	Доля не завершенных проектов в числе всех проектов	R7	Число студентов, аспирантов или сотрудников, прошедших обучение в рамках проектов ИЦ (по сравнению с предыдущим периодом)	P7	Количество внутренних семинаров, воркшопов, мастер-классов, связанных с обменом знаниями между проектными командами	KM7
Показатель ...	Pr _n	Показатель ...	R _n	Показатель ...	P _n	Показатель ...	KM _n
...

Таблица 1 – Система показателей качества деятельности инженерного центра (продолжение)

Показатели технологической инфраструктуры	TI	Показатели маркетинга	M	Показатели функциональной и финансовой независимости	FI
	5	6		7	
Число пользователей программно-технологической платформы проектирования на основе цифровых двойников	TI1	Количество упоминаний инженерного центра в новостях, социальных сетях, профессиональных сообществах	M1	Соотношение бюджетного и привлеченного внебюджетного финансирования Инженерного центра (п. Прб) к финансированию, предоставляемому университетом	FI1
Количество проектов, реализованных на программно-технической платформе относительно общего числа проектов	TI2	Доля новых клиентов в числе заказчиков	M2	Доля доходов Инженерного центра после перечисления денежных средств на общеуниверситетские нужды	FI2
Среднее время реакции техподдержки цифровой платформы на запросы пользователей	TI3	Количество посещений сайта, аккаунтов в социальных сетях (по сравнению с предыдущим периодом)	M3	Экономия за счет использования инфраструктуры университета	FI3
Доля запросов к техподдержке, решенных после первого обращения	TI4	Количество участий представителей центра в профессиональных мероприятиях (по сравнению с предыдущим периодом)	M4	Интенсивность вовлечения общеуниверситетских подразделений в обеспечение деятельности инженерного центра	FI4
Скорость отработки типовых задач с использованием высокопроизводительных вычислений	TI5	Количество новых контактов, установленных на мероприятиях (по сравнению с предыдущим периодом)	M5	Соотношение времени, затрачиваемого персоналом на деятельность инженерного центра, относительно времени на другую деятельность в рамках университета	FI5
Доступность вычислительных ресурсов во время пиковых нагрузок	TI6	Количество публикаций, связанных с деятельностью инженерного центра (по сравнению с предыдущим периодом)	M6	Доля ФОТ сотрудников, получаемая из общеуниверситетских источников	FI6
Количество действующих лицензий программного обеспечения	TI7	Уровень вовлеченности аудитории (просмотры, скачивания, комментарии к контенту)	M7	Среднее время, необходимое для согласования новых проектов и заключения договора с административными службами университета	FI7
Показатель ...	TI _n	Показатель ...	M _n	Показатель ...	FI _n
...

Источник: разработано авторами

Известна модель, предложенная в работе А.В. Корниенко, Е.Р. Мартынец и В.А. Левенцова [11], в которой приведена математическая модель качества на основе комплексного показателя, учитывающая факторы эффективности процессов производства. Данный подход, а также принятые практико-методологические основы квалиметрии позволяют сформировать авторскую модель с фокусировкой на показателях эффективности деятельности инженерного центра.

Так, по результатам оценки показателей может быть сформирована математическая модель комплексной оценки качества деятельности инжинирингового центра на основе системы показателей качества и полученных значений (для краткости формулы не указаны показатели по группам R, KM, M, PR):

$$Q_{total} = w_{TI} \frac{\sum_{i=1}^{N_{TI}} k_{TI_i} Q_{TI_i}}{N_{TI}} + w_P \frac{\sum_{i=1}^{N_P} k_{P_i} Q_{P_i}}{N_P} + \dots + w_{FI} \frac{\sum_{i=1}^{N_{FI}} k_{FI_i} Q_{FI_i}}{N_{FI}} \quad (1)$$

где Q_{total} – суммарное значение комплексного показателя качества деятельности инжинирингового центра; чем выше показатель, тем выше качество деятельности инжинирингового центра;

w_{TI} , w_P , w_{FI} – весовые коэффициенты каждой из групп показателей, сумма всех весов должна равняться единице.

k_{TI_i} , k_{P_i} , k_{FI_i} – весовые коэффициенты отдельных показателей в рамках группы, где i – номер показателя.

Q_{TI_i} , Q_{P_i} , Q_{FI_i} – значения отдельных показателей, например балльные оценки показателей, где i – номер показателя.

N_{TI} , N_P , N_{FI} – общее количество показателей в группе.

На основе суммы значений комплексного показателя качества Q_{total} можно построить модель математической оптимизации, где целесообразно повышение отдельных показателей качества деятельности инжинирингового центра, тем самым обеспечивается повышение комплексного показателя:

$$Q_{total} = w_{TI} \frac{\sum_{i=1}^{N_{TI}} k_{TI_i} Q_{TI_i}}{N_{TI}} + w_P \frac{\sum_{i=1}^{N_P} k_{P_i} Q_{P_i}}{N_P} + \dots + w_{FI} \frac{\sum_{i=1}^{N_{FI}} k_{FI_i} Q_{FI_i}}{N_{FI}} \rightarrow max \quad (2)$$

В то же время стоит отметить вероятность возникновения особых случаев, когда повышение или уменьшение значения отдельных показателей напрямую влияет на значение других показателей в противоположном направлении, что объясняется высокой взаимозависимостью рассматриваемых аспектов. Это требует проведения балансировки значений показателей, в связи с чем в данных случаях целесообразно приведение комплексного показателя к оптимальному значению с применением методов оптимизации:

$$Q_{total} = w_{TI} \frac{\sum_{i=1}^{N_{TI}} k_{TI_i} Q_{TI_i}}{N_{TI}} + w_P \frac{\sum_{i=1}^{N_P} k_{P_i} Q_{P_i}}{N_P} + \dots + w_{FI} \frac{\sum_{i=1}^{N_{FI}} k_{FI_i} Q_{FI_i}}{N_{FI}} \rightarrow opt \quad (3)$$

Выбор той или иной модели математической оптимизации значения комплексного показателя качества деятельности инжинирингового центра сопровождается анализом степени взаимозависимости показателей и их значимости в каждом случае отдельно.

Практик применимость и адекватность предлагаемого подхода к оценке эффективности деятельности инжиниринговых центров подтверждается проведенной оценкой на примере деятельности Инжинирингового центра СПбПУ. Так, в ходе анализа выявлено значение комплексного показателя, равное $Q_{total}^{\text{текущ}} = 7,9$ у.е., при этом максимально возможное значение составляет $Q_{total}^{\max} = 10$ у.е., в связи с чем в центре принята программа развития инжинирингового центра с фокусировкой на повышении показателей, имеющих недостаточно высокое значение.

Заключение

Представленная математическая модель имеет не только теоретическое, но и практическое значение. Например, на ее основе может быть рассчитан средний показатель как по всей деятельности инжинирингового центра, так и по отдельным группам показателей, который может быть использован для сравнения с реальными показателями и выявления «узких мест» для удешевления особого внимания группам, где значения ниже среднего. По результатам оценки могут быть диагностированы проблемы в одном или нескольких ключевых процессах.

Оценка уровня качества деятельности инжинирингового центра на основе приведенной математической модели позволит принимать обоснованные решения по оптимизации процессов, распределению ресурсов, планированию дальнейших улучшений, а также осуществлять мониторинг прогресса, формировать стратегию развития, отчетность для руководства и внешних кураторов деятельности инжинирингового центра. Предложенный

инструментарий может быть также использован как один из шагов для решения задачи по комплексной оценке эффективности деятельности инжинирингового центра, в том числе социально-экономических эффектов (см., например [12]).

Отдельно следует выделить группу показателей взаимодействия инжинирингового центра и университета – приведенные показатели позволяют оценить уровень автономности, уровень оптимизации за счет использования кадров и ресурсов университета, спланировать шаги для совершенствования взаимодействия и повышения эффективности результатов.

Таким образом, математическая модель может выступать как практический инструмент управления инжиниринговым центром, за счет которого можно повысить качество процессов и деятельности в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A New Vision for Center-Based Engineering Research: – Washington, D.C.: The National Academies Press, 2017. – 102 p. – ISBN 978-0-309-45905-1.
2. Ransom B., Hyun K. Industry University Cooperative Research Center (IUCRC) Program [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://www.nrcc.cornell.edu/workshops/insurance/nsf.pdf> (дата обращения: 03.02.2025).
3. Зинов В.Г. Построение многоуровневого взаимодействия вузовских инжиниринговых центров с промышленными компаниями: российский и зарубежный опыт / В.Г. Зинов, О.В. Ерёменко // ИННОВАЦИИ. – 2020. – Вып. 6 (260). – С. 54-61. – ISSN 20713010. – DOI 10.26310/20713010.2020.260.6.007.
4. Рождественский О.И. Центр компетенций Национальной технологической инициативы «Новые производственные технологии» Санкт Петербургского политехнического университета Петра Великого / О.И. Рождественский, А.И. Боровков, Ю.А. Рябов, А.А. Корчевская // ИННОВАЦИИ. – 2019. – Вып. 11 (253). – С. 73-88. – DOI 10.26310/2071-3010.2019.253.11.010.
5. Klitsie J. Overcoming the Valley of Death: A Design Innovation Perspective / J. Kristie, R. Price, C. De Lille // Design Management Journal. – Vol. 14. – Issue 1. – P. 28-41. – ISSN 1942-5074, 1948-7177. – DOI 10.1111/dmj.12052.
6. Боровков А.И. Цифровые двойники и цифровая трансформация предприятий ОПК / А.И. Боровков, Ю.А. Рябов, К.В. Кукушкин, В.М. Марусева, В.Ю. Кулемин // Оборонная техника. – 2018. – Вып. 1. – С. 6–33.
7. "Об утверждении Правил предоставления грантов в форме субсидий из федерального бюджета на реализацию проектов по созданию и развитию инжиниринговых центров на базе образовательных организаций высшего образования и научных организаций" (с изменениями и дополнениями): Постановление Правительства РФ от 01.08.2020 № 1156 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://base.garant.ru/74467657/> (дата обращения: 05.02.2025).
8. NIST and White House Ramping Up Effort to Redesign Technology Transfer Policies // AIP – 01.05.2018 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://ww2.aip.org/fyi/2018/nist-and-white-house-ramping-effort-redesign-technology-transfer-policies> (дата обращения: 14.02.2025).
9. Корниенко А.В. Факторы повышения эффективности процессов организации производства / А.В. Корниенко, В.А. Левенцов // Управление качеством продукции на основе передовых производственных технологий: Сборник тезисов докладов IV Международного форума «Передовые цифровые и производственные технологии». – 2023. – С. 52–57.
10. Кукушкин К.В. Оптимальная бизнес-модель инжинирингового центра: максимизация качества/ К.В. Кукушкин // Управление качеством продукции на основе передовых производственных технологий: сборник тезисов докладов VI Международного форума "Передовые цифровые и производственные технологии". – 2024. С. 59–65.
11. Корниенко А.В. Система качества производственного процесса и надежность технологического оборудования: Промышленные технологии / А.В. Корниенко, Е.Р. Мартынец, В.А. Левенцов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. – 2024. – № 3. – С. 38-43.
12. Gray D. A policy mix experiment to promote start-up success: exploratory evaluation of the NSF Small Business Innovation Research (SBIR) / Industry University Cooperative Research Center (IUCRC) membership supplement / D. Gray, L. McGowen, T. Michaelis, O. Leonchuk, D. Rivers // The Journal of Technology Transfer. – Vol. 47. – Issue 1. – P. 176-212. – ISSN 0892-9912, 1573-7047. – DOI 10.1007/s10961-020-09794-6.

Кукушкин Кузьма Викторович

ФГАОУ ВО «СПбПУ», г. Санкт-Петербург
Аспирант Высшей школы передовых цифровых
технологий ПИШ СПбПУ
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая,
29 лит. АФ
E-mail: kukushkin_kv@spbstu.ru

Мартынец Екатерина Романовна

ФГАОУ ВО «СПбПУ», г. Санкт-Петербург
Аспирант Высшей школы передовых цифровых
технологий ПИШ СПбПУ
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая,
29 лит. АФ
E-mail: martynets_er@spbstu.ru

KUKUSHKIN K.V., MARTYNETS E.R.

MATHEMATICAL MODEL FOR ASSESSING THE QUALITY OF AN ENGINEERING CENTERS PERFORMANCE

Abstract. *The article is devoted to the development of a mathematical model for assessing the quality of an engineering centers performance. A system of indicators is proposed, covering key aspects of the centers activities, such as processes, results, personnel, knowledge management, technological infrastructure, marketing, and financial independence. The model allows for the evaluation of the centers performance quality and identifies areas for improvement.*

Keywords: *engineering center, mathematical model, performance quality, system of indicators, knowledge management, technological infrastructure, financial independence.*

BIBLIOGRAPHY

1. A New Vision for Center-Based Engineering Research. – Washington, D.C.: The National Academies Press, 2017. – 102 p. – ISBN 978-0-309-45905-1.
2. Ransom B., Hyun K. Industry University Cooperative Research Center (IUCRC) Program [Electronic resource]. – Available at: <https://www.nrcc.cornell.edu/workshops/insurance/nsf.pdf> (accessed: 03.02.2025).
3. Zinov V.G. Building a multi-level interaction between university engineering centers and industrial companies: Russian and international experience / V.G. Zinov, O.V. Eremchenko // Innovations. – 2020. – No. 6 (260). – P. 54–61. – ISSN 2071-3010. – DOI 10.26310/20713010.2020.260.6.007.
4. Rozhdestvenskiy O.I. National Technology Initiative Competence Center “Advanced Manufacturing Technologies” at Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University / O.I. Rozhdestvenskiy, A.I. Borovkov, Y.A. Ryabov, A.A. Korchevskaya // Innovations. – 2019. – No. 11 (253). – P. 73–88. – DOI 10.26310/2071-3010.2019.253.11.010.
5. Klitsie J. Overcoming the Valley of Death: A Design Innovation Perspective / J. Klitsie, R. Price, C. De Lille // Design Management Journal. – Vol. 14. – Issue 1. – P. 28–41. – ISSN 1942-5074, 1948-7177. – DOI 10.1111/dmj.12052.
6. Borovkov A.I. Digital twins and digital transformation of defense industry enterprises / A.I. Borovkov, Y.A. Ryabov, K.V. Kukushkin, V.M. Maruseva, V.Y. Kulemin // Defense Technology. – 2018. – No. 1. – P. 6–33.
7. On the approval of the Rules for granting subsidies from the federal budget for the implementation of projects to create and develop engineering centers based on educational and scientific organizations. Decree of the Government of the Russian Federation dated 01.08.2020 No. 1156 [Electronic resource]. – Available at: <https://base.garant.ru/74467657/> (accessed: 05.02.2025).
8. NIST and White House Ramping Up Effort to Redesign Technology Transfer Policies // AIP. – 01.05.2018 [Electronic resource]. – Available at: <https://ww2.aip.org/fyi/2018/nist-and-white-house-ramping-effort-redesign-technology-transfer-policies> (accessed: 14.02.2025).
9. Kornienko A.V. Factors for increasing the efficiency of production organization processes / A.V. Kornienko, V.A. Leventsov // Product quality management based on advanced manufacturing technologies: Abstracts of the IV International Forum “Advanced Digital and Manufacturing Technologies”. – 2023. – P. 52–57.
10. Kukushkin K.V. Optimal business model of an engineering center: quality maximization / K.V. Kukushkin // Product quality management based on advanced manufacturing technologies: Abstracts of the VI International Forum “Advanced Digital and Manufacturing Technologies”. – 2024. – P. 59–65.
11. Kornienko A.V. Production process quality system and reliability of technological equipment: industrial technologies / A.V. Kornienko, E.R. Martynets, V.A. Leventsov // Bulletin of St. Petersburg State University of Technology and Design. – 2024. – No. 3. – P. 38–43.
12. Gray D. A policy mix experiment to promote start-up success: exploratory evaluation of the NSF Small Business Innovation Research (SBIR) / Industry University Cooperative Research Center (IUCRC) membership supplement / D. Gray, L. McGowen, T. Michaelis, O. Leonchuk, D. Rivers // The Journal of Technology Transfer. – Vol. 47. – Issue 1. – P. 176–212. – ISSN 0892-9912, 1573-7047. – DOI 10.1007/s10961-020-09794-6.

Kukushkin Kuzma Viktorovich

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University,
Saint-Petersburg
Postgraduate student of SPbPU School of Advanced
Engineering Studies in Digital Engineering
195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya, 29AF
E-mail: kukushkin_kv@spbstu.ru

Martynets Ekaterina Romanovna

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University,
Saint-Petersburg
Postgraduate student of SPbPU School of Advanced
Engineering Studies in Digital Engineering
195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya, 29AF
E-mail: martynets_er@spbstu.ru

БОНДАРЕВА Л.А., СУХАНОВА М.В., ШУПЛЕЦОВ В.В.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЕКЛ-КОНТРАСТНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ШЕРОХОВАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЛИСТЬЕВ РАСТИТЕЛЬНЫХ ОРГАНИЗМОВ

Аннотация. Проведено исследование оптических свойств шероховатой поверхности листьев растений методом спекл-контрастной визуализации. Показано, что листовые пластины обладают шероховатой поверхностью, параметры которой изменяются в процессе жизнедеятельности растений. Регистрация спекл-контрастных изображений и их анализ путем сравнения контраста изображений позволяют увидеть достаточно заметные изменения, которые происходят с листьями в течении нескольких часов. Происходящие изменения характерны для определенных функциональных состояний всего растения в целом и могут быть использованы для осуществления функциональной диагностики растительных организмов.

Ключевые слова: спекл-контрастная визуализация, шероховатость поверхности, спекл-картина, листья растений, функциональная диагностика растительных организмов.

Введение

Образование гранулярной структуры рассеянного лазерного излучения, известной как оптические спеклы, известно уже не одно десятилетие. Оно базируется на явлении интерференции рассеянных волн когерентного излучения при освещении ансамбля случайно распределенных неоднородностей. Формируемая таким образом спекл-картина явной связи с микроскопическими свойствами освещаемого когерентным пучком света объекта не имеет, однако, проводя статистическую обработку пятнистой структуры, можно получить информацию о микрорельефе и форме объекта, которая содержится в конкретной спекловой структуре [1].

Шероховатая поверхность состоит из большого числа отдельных малых участков с центрами в зеркально отражающих точках, которые можно считать независимыми рассеивающими областями, каждая из которых вносит свой небольшой вклад в формирование волны, отраженной от такой поверхности. Увеличение освещаемой области, а также высоты микронеровностей или, по-другому, крутизна шероховатостей, приводит к тому, что число точек излучения возрастает. Дальнейшее распространение отраженного излучения сопряжено с тем, что рассеянные компоненты в заданной точке наблюдения складываются, причем каждая со своей задержкой. Интерференция этих де-фазированных, но когерентных волн, приводит к гранулярной спекл-картине, а случайные фазы волн, отраженных от различных участков поверхности, однозначно связаны с высотами шероховатостей [1].

Абсолютное большинство поверхностей, изучаемых человеком, являются шероховатыми по сравнению с длиной волны источника излучения. Спекл-картина образуется не только при освещении случайно-неоднородных объектов, но и при пропускании когерентного излучения через прозрачную среду с флуктуирующими в пространстве показателем преломления. Данное явление сейчас широко используется при изучении микроциркуляции крови методом лазерного спекл-контрастного анализа [2]. Работа с биологическими объектами показала, что преимуществом указанного метода является возможность построения систем визуализации процессов в реальном времени по большому полю зрения с охватом значительного участка поверхности, чего не позволяют сделать другие методы исследования. Однако в случае, если объект приходит в движение, перемещается или совершает даже незначительные двигательные акты, измерения проводить нельзя. В настоящее время метод спекл-контрастной визуализации интенсивно развивается, и единственным направлением, где его возможности до сих пор мало изучены, является использование метода применительно к растительным организмам. Несмотря на то, что ряд работ на сегодняшний день использовал в качестве объектов исследования листья растений [3], в целом объем проведенных исследований и полученной информации можно считать незначительным.

Основная часть

Поверхность листа любого растения – это цельная комплексная система, обладающая возможностями фотосинтеза, водно-солевого обмена, терморегулирования и другими свойствами. Крайне важным является и то, что поверхность листа во многих исследованиях

рассматривается как абсолютно гладкая с отсутствием неровностей, жилок и поверхностных ворсинок, тогда как она не является гладкой и имеет шероховатости (рисунок 1).



Рисунок 1 – Изображения поверхности листьев (слева направо):

верхний ряд – Плектрантус ароматного (*Plectranthus amboinicus*), Гейхеры (*Heuchera*), Герани (*Geranium*), Гацании (*Gazania*); нижний ряд – Нивянка обыкновенного (*Leucanthemum vulgare*), Земляники лесной (*Fragaria vesca*), Ивы (*Salix*), Розы чайной (*Rosa odorata*)

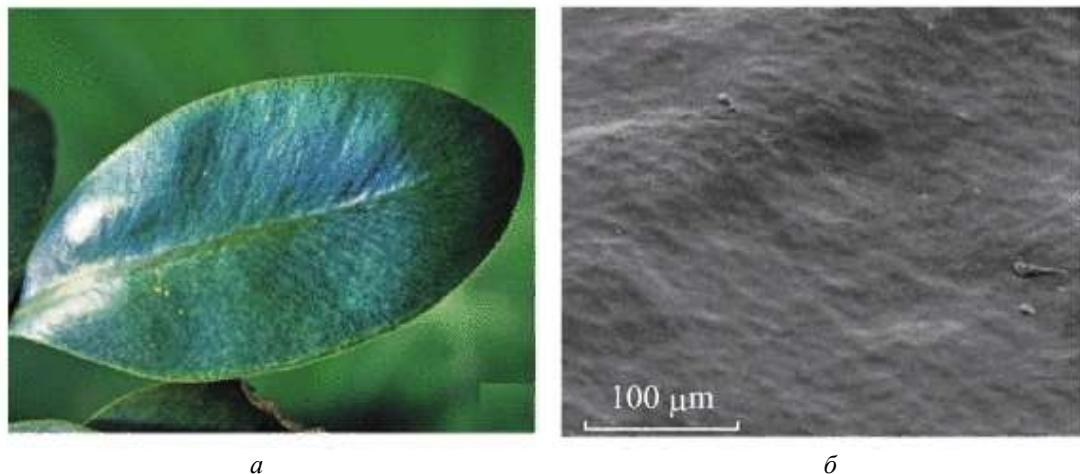
Визуальная оценка листьев показывает крайнее разнообразие исследуемых поверхностей. На рисунке 1 представлены изображения поверхностей листьев различных растений, полученные при 190-кратном увеличении на микроскопе. Отчетливо видны впадины и выпуклости различной формы, формирующие поверхность листьев, причем это не жилки, а площадки, которые при визуальном осмотре воспринимаются как ровные. Крайнее разнообразие образований, их форм и размеров поддерживают исследовательский интерес к этой недостаточно изученной теме и способствуют рассмотрению применения возможностей живой природы к решению различных проблем.

При этом даже листья, отличающиеся практически идеально ровной поверхностью и выглядящие глянцевыми из-за плоской структуры поверхности, при увеличении показывают ее достаточно выраженную шероховатость [4], как это показано на рисунке 2. Очень интересным здесь является тот факт, что от шероховатой поверхности листа зафиксировано формирование зеркального отражения, хорошо заметного на фотографии в виде бликов.

Виды и размеры изученных на данный момент шероховатостей листовых пластин представлены в работах схематично и крайне редко содержат количественную информацию о размере микронеровностей, в тоже самое время есть работы, где демонстрируется именно попытка оценки параметров шероховатой поверхности листьев [5].

Проведенная в связи с этим экспериментальная оценка параметров шероховатой поверхности листьев [6] показала, что наибольшая высота неровностей, зафиксированная в процессе исследования, составляет 130,1 мкм. Величина среднего шага неровностей изменяется в диапазоне от 137,5 до 976,0 мкм. При этом понятие «шероховатость» применяется в случае, когда величина отношения среднего шага S_m к высоте неровностей R_z находится в следующем соотношении $\frac{S_m}{R_z} < 50$ [7]. Определение предельных значений этого отношения показало, что в основной массе образцов наблюдалось присутствие шероховатости на поверхности листьев растительных объектов, т.к. $\frac{S_m}{R_z} = 6,74 \dots 26,63$, т.е. для

количественного описания исследуемой шероховатой поверхности живого биологического объекта возможно использовать комплекс параметров, позволяющий осуществить переход от качественного субъективного восприятия особенностей поверхности лиственных растений к количественному, основанному на значениях измеренных параметров [6].



*Рисунок 2 – Лист Элафоглоссума (*Elaphoglossum wurdackii*) [4]:
а – внешний вид; б – увеличенное изображение*

Однако основной особенностью изучаемого вида шероховатых поверхностей – листьев растений – является то, что в процессе жизнедеятельности микрорельеф поверхности меняется. Причем меняется не постепенно в процессе каких-либо воздействий на исследуемую поверхность, как это происходит с техническими объектами, а достаточно быстро в процессе внутренних изменений растительных организмов, проявляющихся прежде всего в состоянии поверхности их листьев. Прежде всего, конечно, это связано с водообеспечением растения в целом. Тургор листьев растительного объекта, не нуждающегося во влаге, будет таким, что лист будет выглядеть напряженным и не иметь поникших частей. При недостаточном поливе наблюдается увядание листьев, степень которого определяется степенью недостатка влаги.

Рассмотренные особенности характерны для всей листовой пластины в целом и проявляются на стадии, когда зачастую восстановить жизнедеятельность отдельного листа уже невозможно. Но если анализировать первичные проявления этого состояния на отдельном участке листовой пластины, то можно предположить, что снижение тургора листа сопровождается увеличением шероховатости его поверхности, когда происходит образование новых микронеровностей и возрастание параметров ранее присутствовавших.

Сложность регистрации рельефного изображения неровностей поверхностей листьев растений связана, прежде всего, с трудностями определения параметров поверхности именно живого объекта, так как листок достаточно быстро увядает при срыве его с растения, тем самым существенно меняя свои характеристики. Оценить подобные изменения методами микроскопии достаточно трудно, поэтому для исследования изменения шероховатости поверхности листьев в процессе их жизнедеятельности были использованы возможности метода спекл-контрастной визуализации. Стационарность и крайняя ранимость выбранных объектов исследования определили подход, примененный в процессе экспериментального исследования.

Эксперимент проводился над листьями растений путём моделирования ускоренного угнетения их функционального состояния, а именно путем срезания исследуемого листа с растения. Срезанный лист помещался под объектив камеры, выравнивался и в течении всего эксперимента не перемещался для получения объективных спекл-картин.

Таким образом, целью проведенного экспериментального исследования являлось определение возможности наблюдения за изменениями шероховатой поверхности листьев растительных объектов, изменение которой даже при многократном увеличении визуально зафиксировать практически невозможно. Исследуемый объект доступен для наблюдения, но все современные возможности предполагают получение крайне субъективной информации о

состоянии поверхности листовой пластины и особенно о её изменении. Переход от возможностей микроскопии к возможностям спекл-контрастной визуализации (рисунок 3) позволит ответить на вопрос о возможных изменениях шероховатой поверхности растительных объектов, которые сопровождают их жизнедеятельность, так как наблюдающаяся деформация поверхности листа растения приводит к пространственному перемещению спекл-структуры, отражающейся в спекл-картинах.



**Рисунок 3 – Изображения листа Плектрантуса ароматного (*Plectranthus amboinicus*):
а – лист вблизи; б – 50-ти кратное увеличение; в – 190 кратное увеличение; г – спекл-картина листа**

Для регистрации происходящих изменений проводилась двухэкспозиционная запись спекл-структур, первая экспозиция соответствует начальному, неизмененному состоянию поверхности, вторая экспозиция – измененному состоянию объекта. Для регистрации спекл-контрастных изображений была использована установка, включающая лазерный источник с длиной волны 635 нм (Edmund Optics Inc, USA), CMOS-камеру DCC 3260M (Thorlabs, USA) и объектив MVL25M23 f1.4/25mm (Thorlabs, USA). Разрешение камеры 1936x1216; FPS-40; экспозиция 10 мс (использовано оборудование НТЦ Биомедицинской фотоники).

В течении суток проводилась регистрация спекл-картин листа исследуемого растения, а накопленные изображения подвергались анализу. Во всех экспериментах в течении первых часов изображения постепенно начинали отличаться друг от друга (рисунок 4), происходящие изменения со временем стали носить более заметный характер, что в результате привело к достаточно значительному изменению контраста изображения. Подобное изменение вполне объяснимо, так как растение не может мгновенно изменить свое состояние. Вследствие этого и каждый отдельный лист, увядая, теряя влагу, тем ни менее в течении первых часов оставался в достаточно приемлемом состоянии. Несмотря на то, что спекл-картины демонстрировали происходящие изменения, визуальная оценка не выявила никаких изменений в течении первых часов эксперимента. В дальнейшем по завершении суток визуально также стали заметны элементы увядания.

Особенностью спекл-контрастной визуализации является то, что интерференционная картина очень случайна и сильно меняется от малейшего изменения шероховатости, таким образом изменение спекл-изображения соответствует изменению свойств объекта. Методы оптики спеклов позволяют судить о параметрах неоднородностей поверхности по характеристикам образующихся спеклов [8, 9]. Однако визуальная оценка серых изображений затруднена, поэтому для получения спекл-изображений использовался программный пакет Matlab с реализованным алгоритмом пространственно-временной обработки.

При анализе расчет пространственного контраста спекл-изображения производился по усредненным 10 регистрируемым изображениям спекл- поля по области, размер которой составил 7×7 пикселей. Контраст спекл-изображения определялся отношением стандартного отклонения к среднему значению интенсивностей, записанных для каждого пикселя в анализируемом квадрате, при этом контраст изображения слабошероховатого объекта (каковым и является листовая пластина растений) практически линейно зависит от высоты шероховатостей [1], чем больше шероховатость, тем выше контраст спекл-картины.

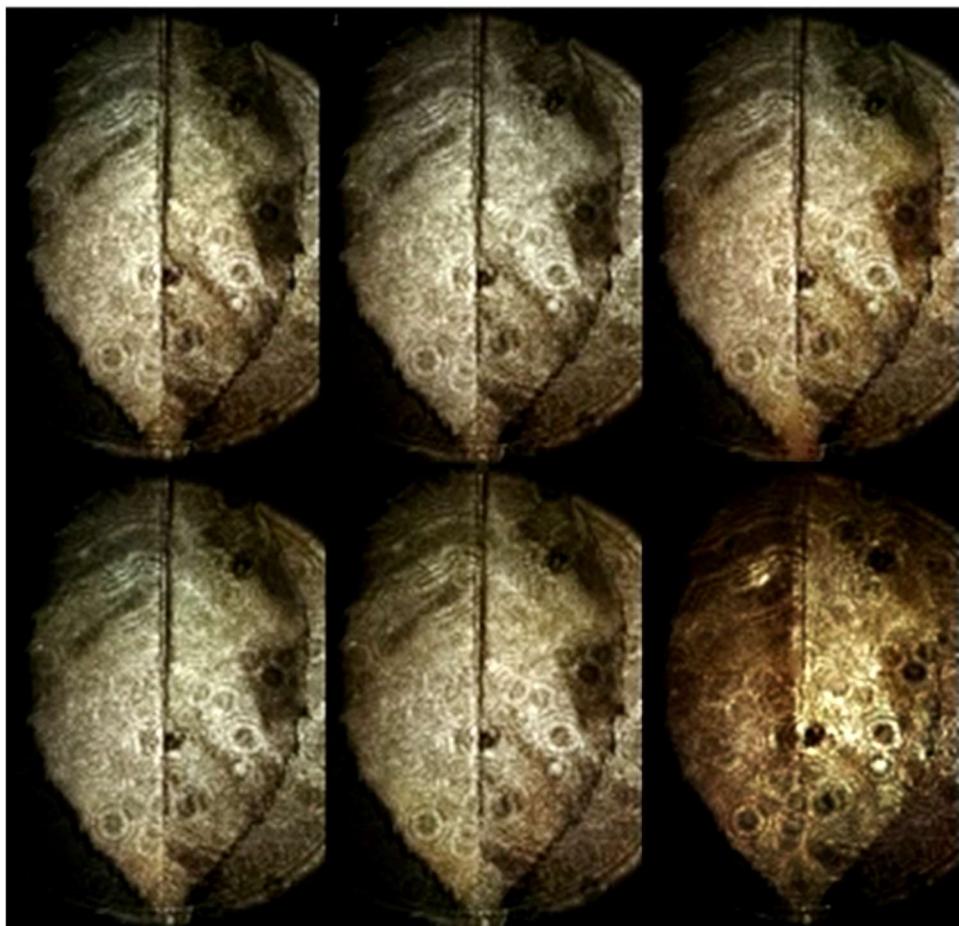


Рисунок 4 – Спекл-картины листа Розы чайной (*Rosa odorata*):
первые пять (слева направо, сверху вниз) получены с периодичностью в один час, последнее шестое изображение зарегистрировано через сутки после начала эксперимента

На рисунке 5 показаны спекл-изображения листьев Эпипремнума золотистого (*Epipremnum aureum*), по которым видна не только визуальная разница, но и существует возможность в каждой отдельно взятой точке получить численное значение контраста спекла и сравнить его с другими значениями, проведя тем самым более объективную оценку зафиксированных изменений. Первое измерение было зарегистрировано в 14:20, а второе – в 17:00. Оценка изменения контраста изображения показывает, что в течении нескольких часов поверхность листа изменилась и стала отличаться большей шероховатостью, что соответствует преобладанию синих тонов на рисунке 5, б.

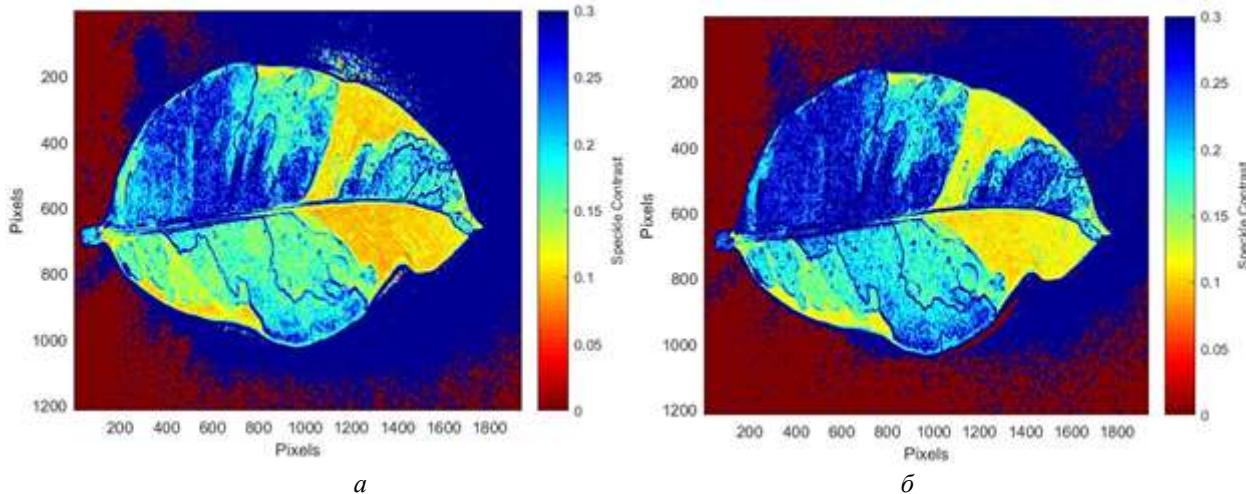
Как известно, спекл-структуры очень чувствительны к изменению положения рассеивающих центров диффузного объекта, поэтому любые такие изменения сразу отражаются на структуре спеклов. Возможность измерения плотности распределения интенсивности отраженного излучения, т.е. основной статистической характеристики спекл-изображения, с дальнейшим расчетом среднего контраста, делают полученные изображения более информативными и привлекательными для последующего анализа и разработки новых подходов к визуализации биологических растительных объектов. В частности, возможность сравнения количественных показателей существенно упрощает оценку полученных результатов и позволяет сделать однозначный вывод о том, что при угнетении функционального состояния листа растения контраст спекла увеличивается, из чего следует, что возрастает шероховатость его поверхности.

Анализ полученных спекл-картин, оценка контраста изображений и их сравнение позволяют увидеть достаточно заметные изменения, которые произошли с листьями в течении нескольких часов.

Заключение

Шероховатость поверхности листьев в процессе их жизнедеятельности претерпевает изменения, и эти изменения характерны для определенных функциональных состояний всего

растения в целом. Если перенести результаты эксперимента с отрезанным листом на живое растение для реализации неинвазивного подхода, то увеличение или уменьшение неровностей поверхности листовой пластины может быть связано с различными факторами, но прежде всего с влагообеспеченностью растения [10]. Именно вода, её содержание в листьях, приводит к тому, что напряженное состояние, характерное для их поверхности, т.е. высокий тургор, приводит к минимизации микронеровностей и снижению шероховатости поверхности листа.



**Рисунок 5 – Спеклы листьев Эпипремнума золотистого (*Epipremnum aureum*):
а – сразу после среза; б – после воздействия на лист растения стресс-факторов (через 2,5 часа после среза)**

Методы спекл-контрастной визуализации позволяют на ранней стадии зарегистрировать увеличение шероховатости, ещё до появления визуально различимых признаков недостатка влаги, когда тургор снижается, а поверхность листовой пластины приобретает более шероховатую структуру.

Ранняя диагностика в данном случае ориентирована не только на оценку изменения состояния поверхности листьев, но и на оценку состояния всего растения, испытывающего недостаток влаги. Вследствие этого развитие методов оценки параметров шероховатой поверхности листьев способствует развитию методов функциональной диагностики растительных объектов в целом, использование которых в последнее время позволяет создавать не только современные технологии в сельскохозяйственной отрасли, но и в сфере природоохранных технологий и технологий рационального водопользования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бадалян Н.П. Лазерная дистанционная спекл-интерферометрия. Модель формирования спекл-структуры // Бадалян Н.П., Кийко В.В., Кислов В.И., Козлов А.Б. – Квантовая электроника, 2008. – Т. 38. – № 5. – С. 477-481.
2. Рогаткин Д.А. Физические основы современных оптических методов исследования микромеханики *in vivo* // Медицинская физика, 2017. – №4. – С. 75-93.
3. Пат. № 2606923 Российской Федерации, МПК A01G 7/00, G01N 21/39. Способ оценки функционального состояния тканей и органов растений, не содержащих хлорофилл / Будаговская О.Н., Будаговский А.В., Будаговский И.А., Гончаров С.А. – Опубл. 10.01.2017 г., Бюл. №1.
4. Barthlott W. Plant Surfaces: Structures and Functions for Biomimetic Innovations // W. Barthlott, M. Maill, B. Bhushan, K. Koch. – Nano-Micro Lett. 2017. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1007/s40820-016-0125-1> (Дата обращения 26.06.2025 г.).
5. Zhang, Z. Roughness measurement of leaf surface based on shape from focus / Z. Zhang, F. Liu, Z. Zhou, et al. // Plant Methods. – 2021. – 17 (72).
6. Бондарева Л.А., Суханова М.В. Исследование шероховатой поверхности листьев растений // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2014. – № 1 (303). – С. 144-151.
7. ГОСТ 25142-82. Шероховатость поверхности. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2018. – 14 с.
8. Франсон М. Оптика спеклов: пер. с фр. под ред. Ю.И. Островского. – М.: Мир, 1980. – 171 с.
9. Ульянов С.С. Что такое спеклы // Соросовский образовательный журнал, 1999. – № 5. – С.112-116.
10. Суханова М.В., Бондарева Л.А. Измерительное устройство для определения уровня влагообеспеченности лиственных растений // Автоматизация в промышленности, 2021. – № 2. – С. 24-28.

Бондарева Людмила Александровна
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл
Кандидат технических наук, доцент кафедры приборостроения, метрологии и сертификации
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Телефон: +7 (4862) 41-98-76
E-mail: 270174@mail.ru

Суханова Марина Владимировна
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Телефон: +7 (911) 385-78-18
E-mail: Suhanova.M.V@yandex.ru

Шуплецов Валерий Витальевич
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл
Ассистент кафедры приборостроения, метрологии и сертификации
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Телефон: +7 (953) 611-16-25
E-mail: valery.shupletsov@bmecenter.ru

BONDAREVA L.A., SUKHANOVA M.V., SHUPLETSOV V.V.

THE USE OF SPECKLE CONTRAST IMAGING TO ASSESS CHANGES IN THE STATE OF THE ROUGH SURFACE OF LEAVES OF PLANT ORGANISMS

Abstract. The optical properties of the rough surface of plant leaves have been studied by speckle contrast imaging. It is shown that leaf plates have a rough surface, the parameters of which change during the vital activity of plants. The registration of speckle contrast images and their analysis by comparing the contrast of the images make it possible to see quite noticeable changes that occur with the leaves within a few hours. The changes that occur are characteristic of certain functional states of the entire plant as a whole and can be used to carry out functional diagnostics of plant organisms.

Keywords: speckle contrast imaging, surface roughness, speckle pattern, plant leaves, functional diagnostics of plant organisms.

BIBLIOGRAPHY

1. Badalyan N.P. Lazernaya distancionnaya spekl-interferometriya. Model formirovaniya spekl-struktury // Badalyan N.P., Kijko V.V., Kislov V.I., Kozlov A.B. – Kvantovaya elektronika, 2008. – T. 38. – № 5. – S. 477-481.
2. Rogatkin D.A. Fizicheskie osnovy sovremennykh opticheskikh metodov issledovaniya mikrogemodinamiki in vivo // Medicinskaya fizika, 2017. – №4. – S. 75-93.
3. Pat. № 2606923 Rossiyskaya Federaciya, MPK A01G 7/00, G01N 21/39. Sposob ocenki funkcionarnogo sostoyaniya tkanej i organov rastenij, ne soderzhashchikh khlorofilla / Budagovskaya O.N., Budagovskij A.V., Budagovskij I.A., Goncharov S.A. – Opubl. 10.01.2017 g., Byul. №1.
4. Barthlott W. Plant Surfaces: Structures and Functions for Biomimetic Innovations // W. Barthlott, M. Mail1, B. Bhushan, K. Koch. – Nano-Micro Lett. 2017. – Rezhim dostupa: <https://doi.org/10.1007/s40820-016-0125-1> (Data obrashcheniya 26.06.2025 g.).
5. Zhang, Z. Roughness measurement of leaf surface based on shape from focus / Z. Zhang, F. Liu, Z. Zhou, et al. // Plant Methods. – 2021. – 17 (72).
6. Bondareva L.A., Sukhanova M.V. Issledovanie sherokhovatoj poverkhnosti listev rastenij // Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii, 2014. – № 1 (303). – S. 144-151.
7. GOST 25142-82. Sherokhovost poverkhnosti. Terminy i opredeleniya. – M.: Standartinform, 2018. – 14 s.
8. Franson M. Optika speklov: per. s fr. pod red. YU.I. Ostrovskogo. – M.: Mir, 1980. – 171 s.
9. Ulyanov C.C. Chto takoe spekly // Korosovskij obrazovatelnyj zhurnal, 1999. – № 5. – S.112-116.
10. Sukhanova M.V., Bondareva L.A. Izmeritelnoe ustroystvo dlya opredeleniya urovnya vlagooobespechennosti listvennykh rastenij // Avtomatizaciya v promyshlennosti, 2021. – № 2. – S. 24-28.

Bondareva Lyudmila Alexandrovna
Orel State University
Associate Professor of the Department of Instrumentation, metrology and certification
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
Phone: +7 (4862) 41-98-76.
E-mail: 270174@mail.ru

Sukhanova Marina Vladimirovna
Orel State University
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
Phone: +7 (911) 385-78-18
E-mail: Suhanova.M.V@yandex.ru

Shupletsov Valery Vitalievich
Orel State University
Assistant of the Department of Instrumentation, metrology and certification
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
Phone: +7 (953) 611-16-25
E-mail: valery.shupletsov@bmecenter.ru

**МАТЕРИАЛЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
«ДИНАМИКА, НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ
МЕХАНИЧЕСКИХ И БИОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ»**

УДК 621.438

DOI: 10.33979/2073-7408-2025-373-5-149-165

ДОЛОГЛОНЯН А.В., МАТВЕЕНКО В.Т., КЛИМЕНКО А.Г.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГИБКИХ КОМБИНИРОВАННЫХ
МИКРОГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ
ПОДОГРЕВОМ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕСТНЫХ
КЛИМАТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ ХОЛОДА
НА ЧАСТИЧНЫХ НАГРУЗКАХ**

Аннотация. Предметом рассмотрения в статье являются исследования комбинированных микрогазотурбинных установок (МГТУ) с промежуточным подогревом (ПП), использующих местные климатические ресурсы холода с помощью утилизационных установок органического цикла Ренкина (ОЦР) на частичных нагрузках. Рассмотрены схемы комбинированных МГТУ с ПП и параллельным блоком утилизации теплоты, содержащим установку ОЦР с дополнительной (сезонной) турбиной и котлом-utiлизатором, осуществляющим теплоснабжение объекта. В качестве рабочих тел установок ОЦР использовались аммиак и хладагент R-134a, поскольку они обеспечивают давления конденсации выше атмосферного при низких температурах окружающей среды. Установлено, что сезонные колебания температуры окружающего воздуха в сибирском регионе Северного морского пути оказывают существенное влияние на эффективность как когенерационных, так и комбинированных МГТУ с ПП, особенно на установки, содержащие регенератор теплоты в составе двигателя. Показано, что наличие дополнительной турбины в составе установки ОЦР повышает эффективность комбинированных МГТУ в широком диапазоне нагрузок на различных режимах нагружения.

Ключевые слова: микрогазотурбинная установка, регенерация теплоты, турбина перерасширения, турбокомпрессорный утилизатор, органический цикл Ренкина, дополнительная турбина, рабочее тело, климатический ресурс холода, частичные нагрузки, промежуточный подогрев.

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. Основной целью когенерационных установок является максимально эффективное использование топлива для комплексного обеспечения потребностей локальных объектов в теплоте и электроэнергии. Для того, чтобы выполнить эту задачу при циклической или переменной нагрузке, компенсируя суточные и сезонные колебания требуется гибкость тепловой и конструктивной схемы когенерационной установки, которая должна быть приспособлена к производству требуемого количества энергии (электрической и тепловой) для разных потребителей.

Для достижения гибкости в объемах производства энергии и высокой тепловой эффективности газотурбинной энергетической установки (ГТУ) можно применить различные тепловые и конструктивные схемы, а также управление потоками теплоты в газотурбинном двигателе (ГТД) [1, 2]. ГТД обладают способностью изменять рабочий процесс за счет управления характеристиками различных элементов двигателя. Изменение характеристик элементов ГТУ и через них процессов в циклах ГТД в определенных условиях может оказывать эффективное управляющее воздействие на изменение теплотехнических характеристик комбинированной ГТУ. Выбор управляемого элемента зависит от тепловой и

конструктивной схемы ГТУ, а также от регламента поставки электрической и тепловой энергии.

Изменять тепловую мощность когенерационного ГТД с помощью параллельного блока утилизации теплоты [3], который позволяет перераспределять поток выхлопных газов между установкой органического цикла Ренкина (ОЦР) и котлом-utiлизатором. Это имеет большое значение при циклической или переменной тепловой нагрузке. Климат большинства портов сибирского региона Северного морского пути (Игарка, Дудинка и т.д.) является резко континентальным и сезонные перепады температур находятся в пределах 40 °С. Это обстоятельство позволяет использовать местный климатический ресурс холода (МРХ) для повышения эффективности установок ОЦР [4, 5].

Для энергоснабжения локальных объектов распространенным вариантом является применение когенерационных микрогазотурбинных установок (МГТУ) мощностью от нескольких киловатт до 1 МВт, освоенных отечественным производителем. Перспективными с точки зрения освоения промышленностью являются 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 за счет наличия промежуточной камеры сгорания. Кроме того, микрогазотурбинные двигатели (МГТД) с промежуточным подогревом, включающие в себя турбокомпрессорный утилизатор, обладают повышенной эффективностью.

Генератор МГТУ вырабатывает электрическую энергию переменного тока повышенной частоты, которая пропорциональна частоте вращения микротурбины (до 1500...2000 Гц). Для получения напряжения промышленной (50 Гц) или бортовой (400 Гц) частоты, требуется установка либо механического редуктора, как это делает компания Ingersoll-Rand, либо силового управляемого электронного преобразователя (СЭП) [6].

СЭП МГТУ строятся по схеме со звеном постоянного тока (рисунок 1). Высокочастотное многофазное (чаще трехфазное) нестабилизированное напряжение генератора сначала выпрямляется, а после с помощью инвертора преобразуется в трехфазное напряжение необходимого качества. Применение такой схемы позволяет легко обеспечить обмен энергией между генератором и нагрузкой. К шине постоянного тока может быть подключен как буферный накопитель электроэнергии, так и другие потребители постоянного тока.

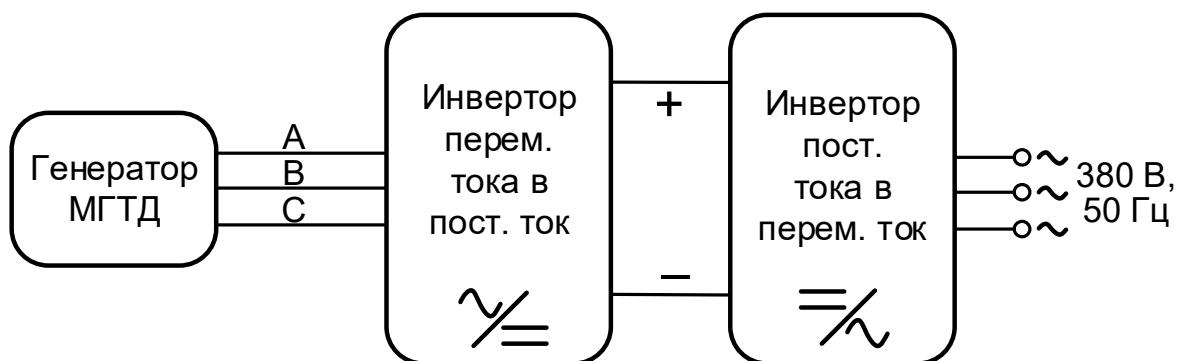


Рисунок 1 – Функциональная схема силового электронного преобразователя

По сравнению с механическим редуктором применение СЭП снижает потери и упрощает конструкцию машины. Поскольку генератор механически отделен от промышленной частоты, частоту вращения турбины можно изменять. Это приводит к повышению эффективности в области частичных нагрузок.

В данной работе будет рассмотрены характеристики гибких МГТУ на базе МГТД с промежуточным подогревом, параллельным блоком утилизации теплоты и использованием местных климатических ресурсов холода на частичных нагрузках при различных способах нагружения.

Базовые схемы МГТУ с ПП, работающих на органическом топливе

В общем случае, схемы 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 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 2), 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 [7-10] с целью повышения мощности ГТД;
- применения комбинации предыдущих методов.

На рисунке 3 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.

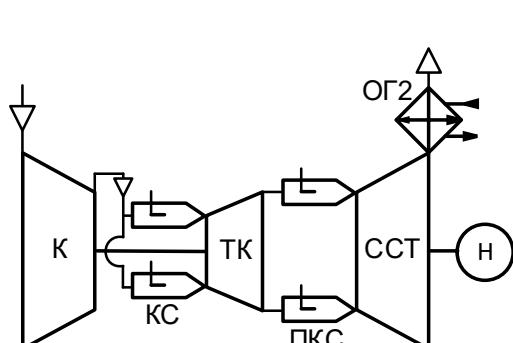


Рисунок 2 – Схема когенерационной МГТУ на базе ПЦ+ПП: К – компрессор; КС – камера сгорания; ПКС – промежуточная камера сгорания; ТК – турбина компрессора; ССТ – свободная силовая турбина; ОГ2 – охладитель газов; Н – нагрузка

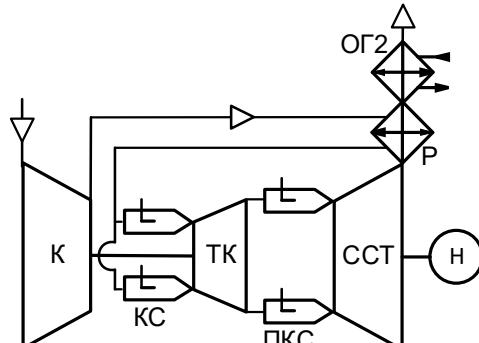


Рисунок 3 – Схема когенерационной МГТУ ПЦ+Р+ПП: Р – регенератор; остальные обозначения как на рисунке 1

На рисунке 4 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-utiлизатора, образует турбокомпрессорный утилизатор (ТКУ). Посредством применения в рабочем цикле перерасширения рабочих газов за силовой турбиной увеличивается мощность двигателя при том же расходе топлива и, следовательно, повышается КПД двигателя.

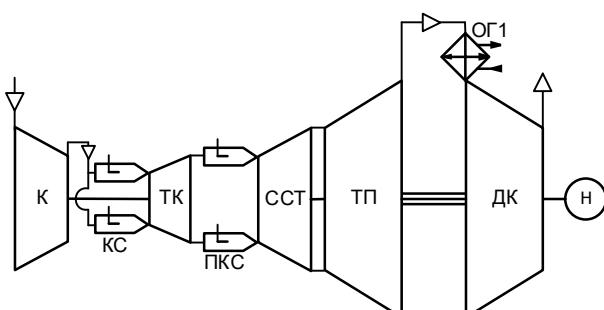


Рисунок 4 – Схема когенерационной МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+ПП: ТП – турбина; ОГ1 – охладитель газов; ДК – дожимающий компрессор; остальные обозначения как на рисунке 1

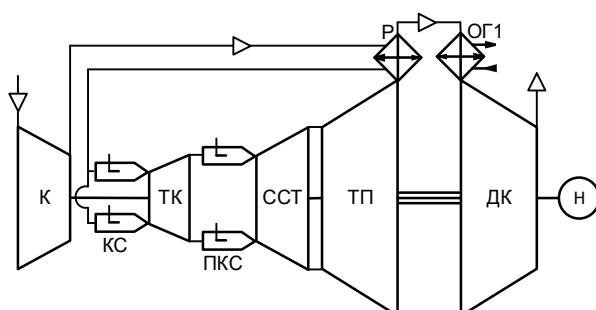


Рисунок 5 – Схема МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+Р+ПП: остальные обозначения как на рисунке 1-3

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 5 изображена схема МГТД с ТКУ и регенерацией теплоты. Охладитель газа ОГ1 обеспечивает понижение температуры газа перед ДК с целью снижения в нем работы сжатия, а также выполняет функцию котла-utiлизатора для обеспечения локального объекта теплотой.

Методика и результаты исследования характеристик базовых МГТУ на номинальном режиме

Исследование характеристик рабочих циклов МГТУ при работе на номинальном режиме производилось с использованием физико-математических моделей и программного обеспечения, ранее опробованного при анализе параметров ГТУ, приведенных в работе [7-9].

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 ¹	–	0,9
Адиабатный КПД дожимающего компрессора ²	–	0,88
КПД камеры сгорания	–	0,99
КПД электрогенератора	–	0,96
Коэффициент восстановления давления в регенеративном теплообменнике со стороны газа для ПЦ+Р ³	–	$\varepsilon_e = \frac{1-r}{2c_e r} \left(\sqrt{1+4c_e \frac{r}{1-r}} - 1 \right)$
Коэффициент восстановления давления в регенеративном теплообменнике со стороны газа для ПЦ+ТКУ+Р ³	–	$\varepsilon_e = \frac{1}{2c_e (\varepsilon_{o\kappa 1} \pi_{\kappa})^2} \frac{1-r}{r} \left(\sqrt{1+4c_e (\varepsilon_{o\kappa 1} \pi_{\kappa})^2 \frac{r}{1-r}} - 1 \right)$
Коэффициент восстановления давления в регенеративном теплообменнике со стороны воздуха ³	–	$\varepsilon_e = 1 - \frac{c_e}{\pi_{\kappa}^2} \frac{r}{1-r}$
Коэффициент восстановления давления на входе в установку, ε_{ex}	–	0,96
Коэффициент восстановления давления в промежуточном охладителе воздуха, ε_{ob}	–	0,94
Коэффициент восстановления давления в КС, ε_{kc}	–	0,96
Коэффициент восстановления давления на выходе из установки, ε_{ebyx}	–	0,97
Коэффициент восстановления давления охладителей газа (ОГ1 и ОГ2), $\varepsilon_{o\kappa 1}, \varepsilon_{o\kappa 2}$	–	0,96
Температура газов на выходе из ОГ1 и ОГ2	К	323
Температура окружающего воздуха	К	288
Влажность окружающего воздуха	%	60

Примечания

1, 2 – более высокие параметры компрессора и турбины связаны с масштабным эффектом в вакуумном цикле, поскольку давление рабочего тела за турбиной ниже атмосферного примерно в 2 раза, то соответственно во столько же раз размеры проточных частей компрессора и турбины больше, чем у компрессора и турбины в обычном цикле.

3 – коэффициенты c_e и c_o определялись из параметров существующих прототипов [16].

В настоящее время в микрогазотурбинной технике достигнуты значительные успехи в области повышения эффективности ее элементов [11, 12]. В МГТУ необходимо учитывать конструктивные факторы, влияющие на аэродинамические характеристики компрессоров и турбин [11-14]. Так политропный КПД центробежного компрессора находится в пределах

$\eta_k = 80 \dots 82\%$, радиально-осевой турбины $\eta_m = 85 \dots 86,5\%$, а адиабатный КПД диагональных лопаточных машин $88 \dots 90\%$. В настоящее время применение доступных сплавов ЖС36 и ЖС40 позволяет иметь температуру газа перед турбиной до 1373 К включительно [15], при этом турбинная ступень высокого давления может быть неохлаждаемой. Для МГТУ характерно наличие теплообменных аппаратов, которые должны обеспечивать требуемые параметры рабочего тела в цикле, но при этом иметь оптимальные потери давления и, соответственно, габаритные размеры для МГТУ. Так при применении регенератора, габариты которого существенно зависят от конструкции теплообменной матрицы, ее плотности и площади поверхности теплопередачи, для микротурбины оптимальная степень регенерации зависит от гидравлического сопротивления регенератора и давления рабочей среды по каждой из теплообменяющихся сторон [16]. Большинство мировых производителей МГТД («Микрогазотурбинные технологии», «Elliott», «Turbec», «Ingersoll R») используют степень регенерации 0,9 [17, 18].

Для моделирования установок, изображенных на рисунках 2-5, были приняты параметры, представленные в таблице 1.

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 компрессоре ТКУ – 3,5 (для снижения массогабаритных показателей ОГ1);
- максимальная степень сжатия в одной ступени центробежного компрессора – 12 [18];
- максимальная степень расширения в одной ступени турбины – 5 (радиально-осевая турбина) и 6 (центро斯特ремительная турбина).

Результаты исследования характеристик базовых МГТУ с ПП

Анализ характеристик циклов МГТУ с ПП производился при изменении степени повышения давления π_k в компрессоре двигателя, дожимающем компрессоре π_{dk} , степени регенерации σ и прочих равных фиксированных параметрах, характерных для микрогазотурбинных установок. Результаты такой оптимизации МГТУ, работающих по схемам, изображенным на рисунках 2-5 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 2 - Результаты оптимизации базовых когенерационных МГТУ с ПП на номинальном режиме с учетом ограничений

Наименование параметра	Ед. изм.	ПЦ+ПП	ПЦ+Р+ПП	ПЦ+ТКУ+ПП	ПЦ+ТКУ+Р+ПП
Эффективный КПД МГТУ	%	23,6	39,0	35,2	41,9
Температура газов на входе в охладитель газов	К	1127	601	863	570
Оптимальная степень повышения давления в компрессоре	–	12	5,9	12	5,2
Оптимальная степень повышения давления в ДК	–	–	–	3,5	2
Оптимальная степень регенерации	–	–	0,9	–	0,9
Удельная мощность на валу силовой турбины	кДж/кг	297	225	443	289
Удельная тепловая мощность	кДж/кг	893	283	582	253
КПД теплотехнический	%	93	86	80	79

Результаты исследования характеристик комбинированных МГТУ с ПП

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.

Свойства рабочих тел для установок ОЦР взяты в [19] (см. табл. 4).

Из представленных в таблице 4 рабочих тел только аммиак и R-134a подходят для работы в установках ОЦР в климатических условиях портов сибирского региона Северного морского пути (см. рисунок 6) ввиду низкой температуры конденсации. 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 и R-134a будет использоваться установка ОЦР без регенерации.

Таблица 3 – Параметры установок ОЦР на номинальном режиме

№	Наименование параметра	Ед. измерения	Численное значение
1.	Адиабатный КПД турбины	–	0,82
2.	КПД насоса	–	0,78
3.	Коэффициент восстановления давления в парогенераторе	–	0,92
4.	Коэффициент восстановления давления в конденсаторе	–	0,96
5.	Коэффициент восстановления давления в регенеративном теплообменнике	–	0,96
6.	Степень регенерации	–	0,9
7.	Минимальный температурный напор на выходе из испарительного пучка, ΔT_2	К	15
8.	Температура конденсации	К	$T_a + 25$
9.	Температурный напор между теплоносителем и перегретым паром на выходе из пароперегревателя, ΔT_1	К	50
10.	Расход теплоносителя	кг/с	≈ 1
11.	Кратность циркуляции рабочего тела	–	1

Таблица 4 – Некоторые свойства известных рабочих тел

Обозначение рабочего тела	Молекулярный вес	Критическое давление, МПа	Критическая температура, К	Температура конденсации при 0,1 МПа, К	Температура разложения, К
R-717 (аммиак)	17,03	11,33	405,4	196	924
R-718 (вода)	18	22,06	647,3	373	2470
R-123	152,93	3,66	456,83	303	899
R-1233zd	130,5	3,57	438,75	292	824
R-134a	102	4,06	374,23	247	682
R-245fa	134,05	3,64	427,2	289	659

Температура окружающей среды и относительная влажность [22] для порта Игарка (см. рисунок 5) определялись по формулам

$$T_a = -26,1 - 0,297n - 1,46n^2 + 1,16n^3 - 0,164n^4 + 0,0065n^5, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1)$$

$$\varphi = 0,86 - 0,00705T_a - 0,0004T_a^2 - 0,0000157T_a^3 - 2,34 \times 10^{-7}T_a^4, \quad (2)$$

где n – номер текущего месяца.

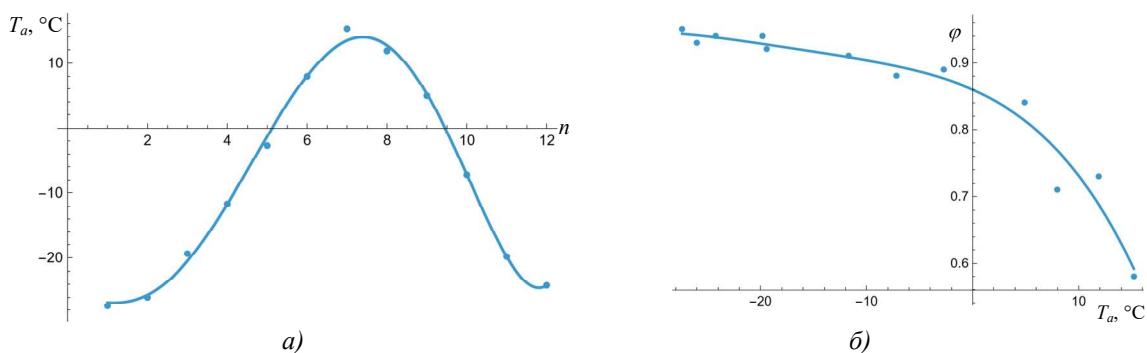


Рисунок 6 – Среднемесячные температура и относительная влажность окружающей среды порта Игарка: а) зависимость температуры окружающей среды от календарного месяца; б) зависимость относительной влажности окружающей среды от температуры

Схемы комбинированных МГТУ с ПП, использующих МРХ

Схемы гибких комбинированных микрогазотурбинных установок с ПП, параллельным блоком утилизации теплоты и использованием местных климатических ресурсов холода на базе приведенных выше (см. рисунки 2-5) и установок ОЦР с дополнительной турбиной приведены на рисунках 7-10.

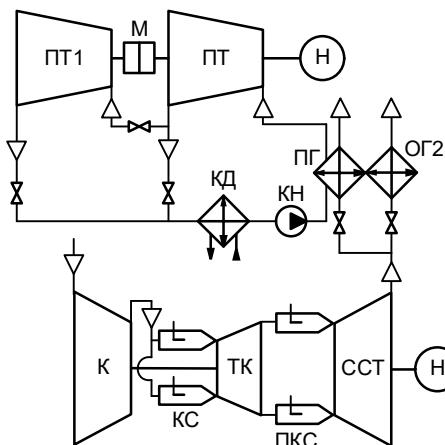


Рисунок 7 – Схема комбинированной МГТУ с ПП на базе ПЦ: ПТ – паровая турбина; ПТ1 – дополнительная паровая турбина; КД – конденсатор; ПН – питательный насос; ПГ – парогенератор; М – разъединительная муфта; остальные обозначения как на рисунок 2

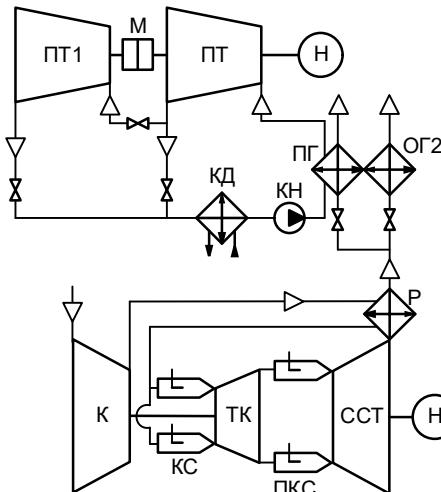


Рисунок 8 – Схема комбинированной МГТУ с ПП на базе ПЦ+Р: остальные обозначения как на рисунок 3 и 7

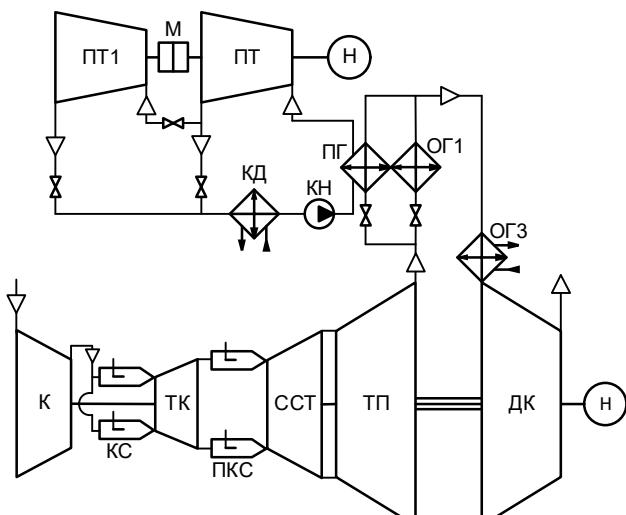


Рисунок 9 – Схема комбинированной МГТУ с ПП на базе ПЦ+ТКУ: остальные обозначения как на рисунок 4 и 7

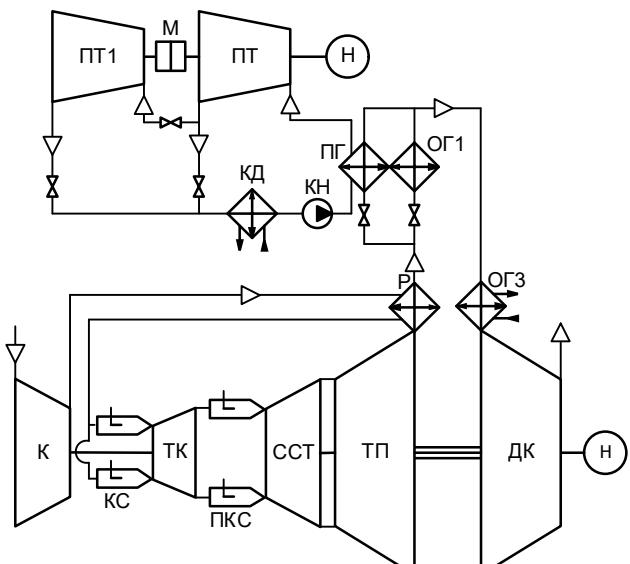


Рисунок 10 – Схема комбинированной МГТУ с ПП на базе (ПЦ+ТКУ+Р): остальные обозначения как на рисунок 5 и 7

Методика и исследования характеристик комбинированных МГТУ с ПП, использующих МРХ

Исследование характеристик рабочих циклов МГТД с ПП производилось с использованием физико-математических моделей и программного обеспечения, ранее опробованного при анализе параметров в МГТУ, приведенных в работе [7], а характеристик установок ОЦР на моделях, использованных в [20]. Анализ характеристик циклов МГТД на частичных нагрузках производился на винтовом и изотермическом режимах с блокированной силовой турбиной и свободным ТКУ согласно методикам, предложенными в работах [23, 24] и опробованных, например, в работе [25].

Установки, изображенные на рисунках 7-10, были исследованы при стандартных условиях в работе [3]. Однако, реальные климатические условия вызывают серьезные колебания базовых параметров работы комбинированных МГТУ с ПП, как на собственно

МГТД с ПП, так и на установку ОЦР. Влияние температуры окружающей среды на эффективность ГТД исследовано в работе [26, 27]. Влияние температуры окружающей среды на эффективность ОЦР в составе комбинированной установки обусловлено изменчивостью температуры выхлопных газов, которые являются источником теплоты для ОЦР. Кроме того, в работах [4, 5] предложен способ использования сезонных колебаний температуры окружающей среды для повышения эффективности работы установок ОЦР, заключающийся в том, что предлагается установить последовательно по рабочему телу к основной турбине как минимум одну дополнительную («сезонную») турбину, которая включается в работу через разъединительную муфту по достижении температуры конденсации, зависящей от температуры окружающей среды, достаточной для обеспечения оптимальных параметров эффективности и основной и дополнительной турбин. В работе [28] было рассмотрено влияние температуры и влажности окружающей среды на эффективность комбинированных МГТУ. Некоторые результаты при изотермическом способе регулирования нагрузки представлены на рисунке 11, а при винтовом – на рисунке 12.

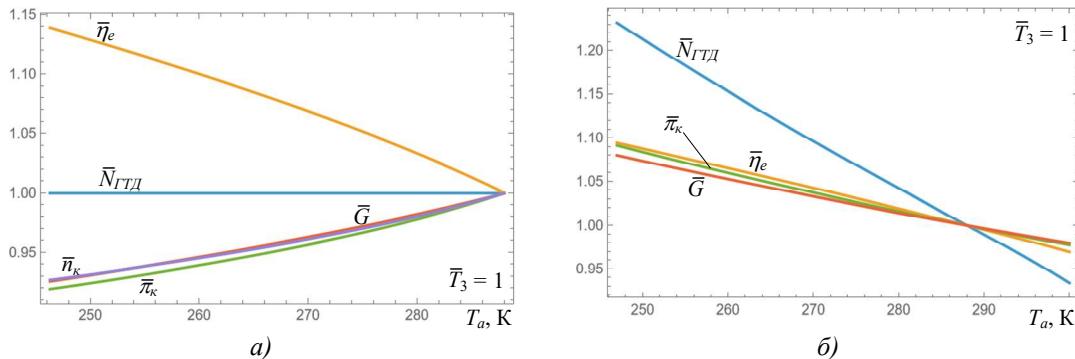


Рисунок 11 – Зависимость относительных параметров от температуры окружающего воздуха:
а) МГТД на базе ПЦ+ТКУ+Р+ПП при постоянной мощности и $T_3 = \text{const}$; б) МГТД на базе ПЦ+ТКУ+Р+ПП при $T_3 = \text{const}$

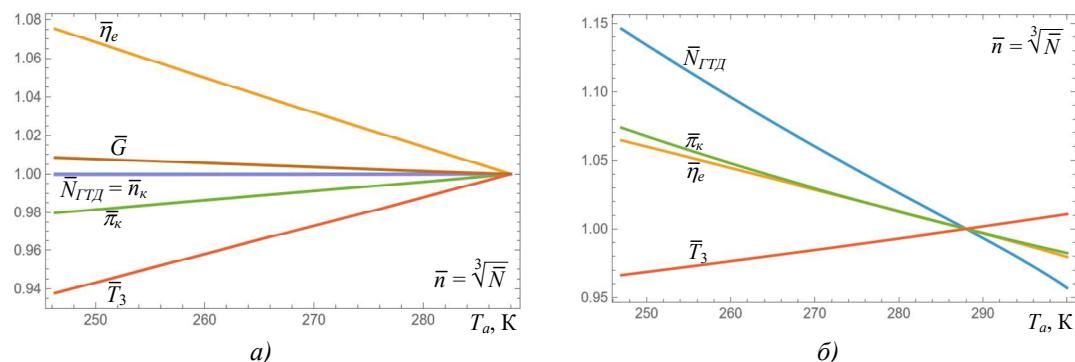


Рисунок 12 – Зависимость относительных параметров от температуры окружающего воздуха: а) МГТД на базе ПЦ+ТКУ+Р+ПП при постоянной мощности и винтовом способе регулирования; б) МГТД на базе ПЦ+ТКУ+Р+ПП при винтовом способе регулирования

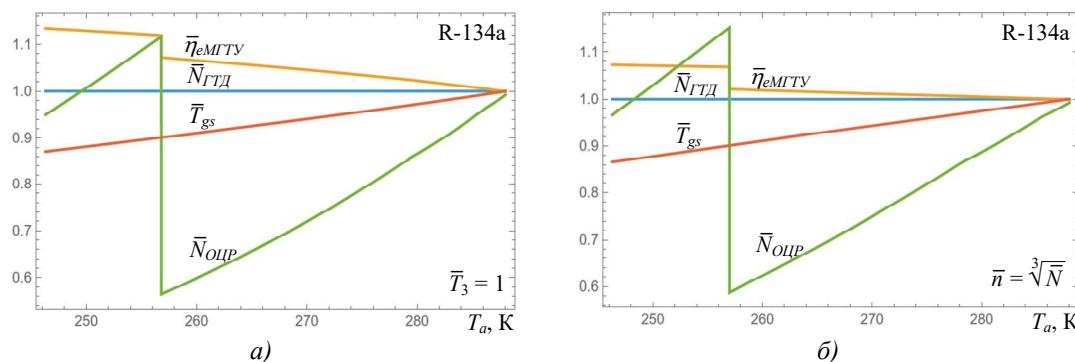


Рисунок 13 – Зависимость относительных параметров комбинированной МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+Р+ПП и установки ОЦР с R-134a от температуры окружающего воздуха: а) изотермический способ регулирования; б) винтовой способ регулирования

На рисунках 11-13 относительный расход наружного воздуха находится по формуле

$$\bar{G} = \frac{G}{G_0},$$

где G – расход рабочего тела через компрессор при текущей температуре окружающего воздуха, кг/с; G_0 – расход рабочего тела через компрессор при стандартных условиях, кг/с;

$$\bar{\pi}_\kappa = \frac{\pi_\kappa}{\pi_{\kappa 0}},$$

где π_κ – степень повышения давления в компрессоре при текущей температуре окружающего воздуха; $\pi_{\kappa 0}$ – степень повышения давления в компрессоре при стандартных условиях;

$$\bar{N}_{GTД} = \frac{N_{GTД}}{N_{GTД0}},$$

где $N_{GTД}$ – удельная (на единицу расхода воздуха) мощность МГТД при текущей температуре окружающего воздуха, кДж/кг; $N_{GTД0}$ – удельная мощность МГТД на номинальном режиме при стандартных условиях, кДж/кг;

$$\bar{\eta}_e = \frac{\eta_e}{\eta_{e0}},$$

где η_e – эффективный КПД когенерационной МГТУ при текущей температуре окружающего воздуха; η_{e0} – эффективный КПД когенерационной МГТУ при стандартных условиях;

$$\bar{n}_\kappa = \frac{n_\kappa}{n_{\kappa 0}},$$

где n_κ – обороты компрессора при текущей температуре окружающего воздуха, с⁻¹; $n_{\kappa 0}$ – обороты компрессора при стандартных условиях, с⁻¹;

$$\bar{\eta}_{eMGTU} = \frac{\eta_{eMGTU}}{\eta_{eMGTU0}},$$

где η_{eMGTU} – эффективный КПД МГТУ при текущей температуре окружающего воздуха; η_{eMGTU0} – эффективный КПД МГТУ при стандартных условиях;

$$\bar{T}_{gs} = \frac{T_{gs}}{T_{gs0}},$$

где T_{gs} – температура газов на выходе из МГТД при текущих условиях работы, К; T_{gs0} – температура газов на выходе из МГТД при стандартных условиях работы, К;

$$\bar{N}_{OCP} = \frac{N_{OCP}}{N_{OCP0}},$$

где N_{OCP} – удельная (на единицу расхода воздуха) мощность установки ОЦР МГТУ при текущей температуре окружающего воздуха, кДж/кг; N_{OCP0} – удельная мощность установки ОЦР МГТУ на номинальном режиме при стандартных условиях, кДж/кг;

$$g_{oe2} = \frac{G_{oe2}}{G_e},$$

где G_{oe2} – расход рабочего тела через ОГ2 или ОГ1 (зависит от схемы МГТД), кг/с; $G_{ПГ}$ – расход рабочего тела через ПГ, кг/с; $G_e = G_{oe2} + G_{ПГ}$ – расход рабочего тела на выходе из силовой турбины, кг/с;

$$\bar{N} = \frac{N}{N_0} = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{N_{GTДi} + N_{ti} + k_{\tau i} N_{ti,дон}}{N_{GTДi} + N_{ti}} \right),$$

где N – удельная (на единицу расхода воздуха) мощность комбинированной МГТУ на номинальном режиме, кДж/кг; N_0 – удельная мощность комбинированной МГТУ на номинальном режиме при $g_{oe2} = 0$, кДж/кг; $N_{GTДi}$ – удельная мощность МГТД на номинальном режиме для i -го месяца, кДж/кг.

Рисунок 11 показывает, что в случае обеспечения постоянной мощности МГТД с ПП и изотермического способа регулирования при снижении температуры окружающего воздуха

эффективность двигателя (см. рисунок 11 a), возрастает, а другие параметры, отмеченные на рисунке, снижаются. В противном случае (см. рисунок 11 b) мощность двигателя может возрасти до 23 % при незначительном относительно росте (порядка 8...10 %) π_k , η_e и G . Для винтового способа регулирования (см. рисунок 12 a) при снижении температуры окружающего воздуха характерно поддержание постоянной мощности при постоянном числе оборотов и некотором росте расхода воздуха и КПД, а также снижение π_k и T_3 . В случае отсутствия ограничений на мощность (см. рисунок 12 b) при снижении температуры окружающего воздуха наблюдается рост мощности (до 15 %), π_k и эффективности МГТД с ПП (до 6...7 %) и уменьшение T_3 .

Относительный прирост эффективности МГТУ с ПП (см. рисунок 13 a) при поддержании $T_3 = \text{const}$ для режима постоянной мощности МГТД в период работы дополнительной турбины установки ОЦР в этом случае составляет около 6 %. При этом характерно снижение мощности установки ОЦР из-за с понижения температуры уходящих газов МГТД с уменьшением T_a . Для винтового способа регулирования ситуация качественно не меняется, однако в результате того, что эффективность двигателя растет при снижении T_a медленнее, чем при изотермическом, то и мощность установки ОЦР падает медленнее, а прирост ее мощности от подключения дополнительной турбины выше. Качественно ситуация, изображенная на рисунках 11-13 повторяется для всех базовых конфигураций МГТУ (см. рисунки 2-5) за исключением машин без регенерации при винтовом способе нагружения (см. рисунок 14).

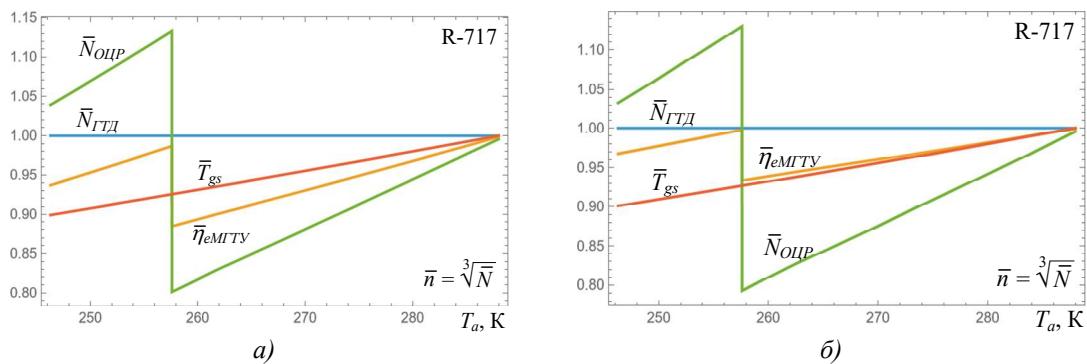


Рисунок 14 – Зависимость относительных параметров комбинированной МГТУ и установки ОЦР с R-717 при винтовом способе нагружения от температуры окружающего воздуха:
а) на базе ПЦ+ПП; б) на базе ПЦ+ТКУ+ПП

Рисунок 14 наглядно иллюстрирует, что для приводных машин без регенератора эффективность комбинированной МГТУ при уменьшении T_a на любых нагрузках будет ниже, чем на стандартной. Использование дополнительной турбины при низких T_a лишь частично компенсирует это снижение.

Результаты исследования базовых МГТУ (см. рисунки 2-5) на частичных нагрузках при стандартных и пониженных температурных условиях представлены на рисунках 15-18 при винтовом и изотермическом способах нагружения.

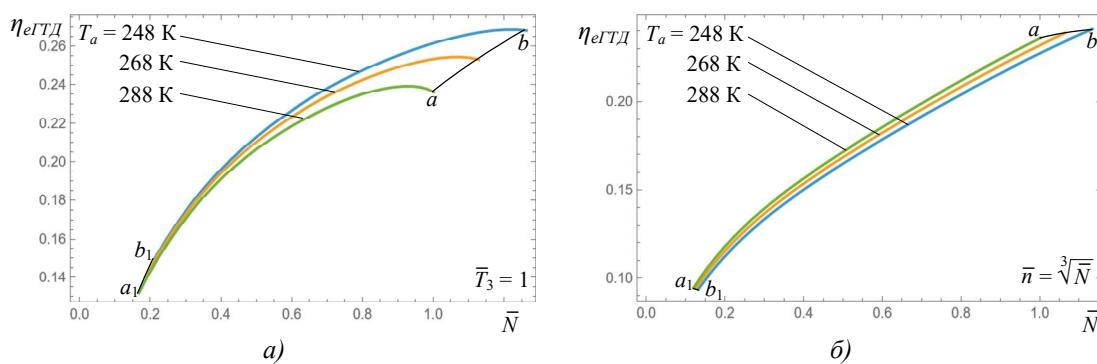


Рисунок 15 – Зависимость КПД МГТУ на базе ПЦ+ПП от относительной мощности и T_a при изотермическом (а) и винтовом (б) способах нагружения

Характер кривых эффективности МГТД, представленных на рисунках 15-18, подробно рассмотрен в работе [26]. Из вышеуказанных рисунков видно, что зависимость эффективности от температуры на частичных нагрузках определяется в первую очередь наличием / отсутствием регенератора в схеме МГТД. Наличие регенератора в составе МГТД существенно влияет на эффективность при снижении Та практически во всем доступном диапазоне мощностей. Это объясняется тем, что с одной стороны при снижении Та очевидно снижается и работа компрессора, что приводит к уменьшению расхода топлива, но с другой стороны снижается температура воздуха за компрессором, что приводит к росту расхода топлива.

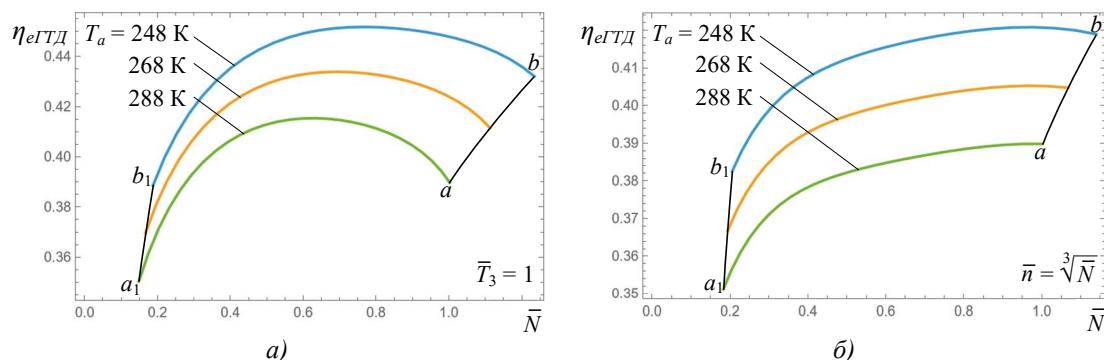


Рисунок 16 – Зависимость КПД МГТУ на базе ПЦ+Р+ПП от относительной мощности и T_a при изотермическом (а) и винтовом (б) способах нагружения

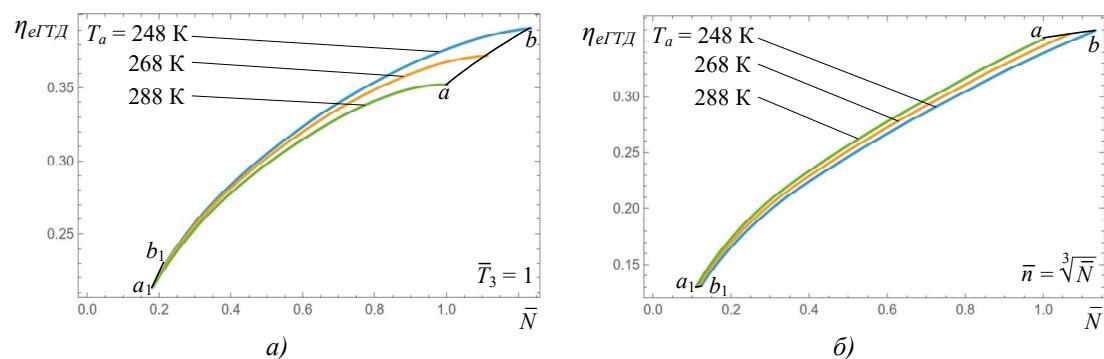


Рисунок 17 – Зависимость КПД МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+ПП от относительной мощности и T_a при изотермическом (а) и винтовом (б) способах нагружения

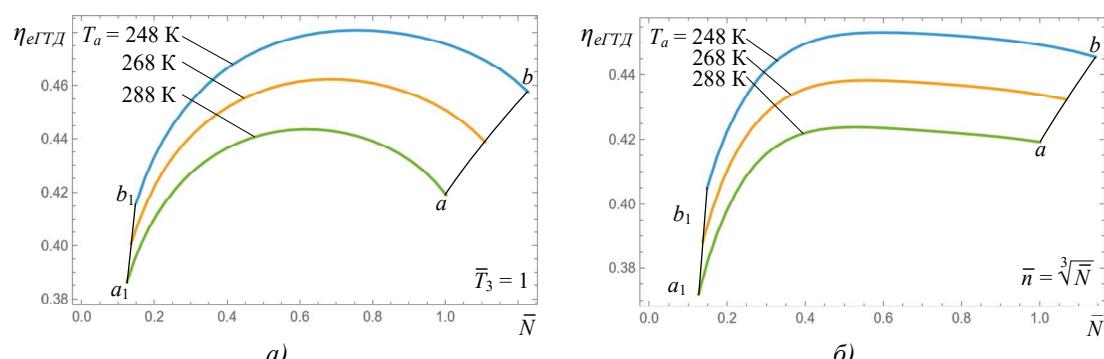


Рисунок 18 – Зависимость КПД МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+Р+ПП от относительной мощности и T_a при изотермическом (а) и винтовом (б) способах нагружения

Наличие регенератора в составе МГТД при высокой степени регенерации практически нивелирует рост расхода топлива, связанный со снижением температуры воздуха за компрессором. Это обеспечивает более высокий рост КПД машин с регенерацией по сравнению с другими. Кривые ab и a_1b_1 представляют собой линии постоянного физического расхода наружного воздуха. Характер графиков на рисунках 15б и 17б показывает, что машины без регенерации при винтовом способе регулирования увеличивают эффективность при снижении температуры без ограничения мощности и снижают – при поддержании мощности на постоянном уровне.

Результаты исследования комбинированных МГТУ на базе МГТД ПЦ+ПП и ОЦР без регенерации с аммиаком в качестве рабочего тела (см. рисунок 7) на частичных нагрузках изображены на рисунке 19.

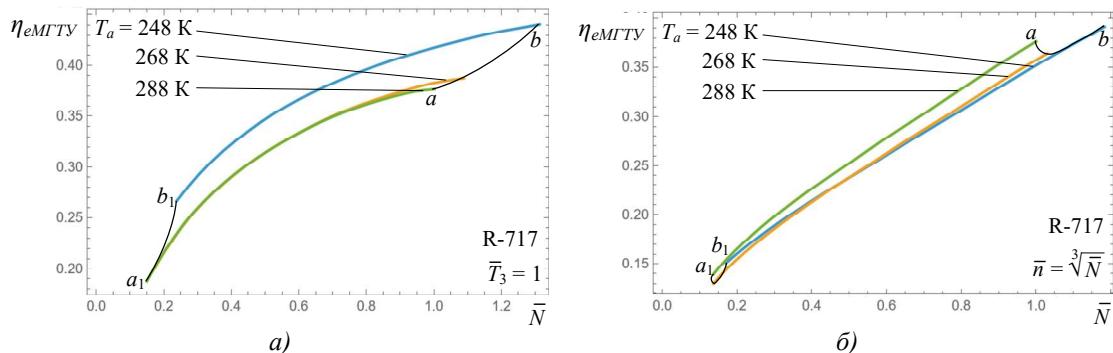


Рисунок 19 – Зависимость КПД МГТУ на базе ПЦ+ПП и установкой ОЦР с дополнительной турбиной от относительной мощности и T_a при изотермическом (а) и винтовом (б) способах нагружения

Анализ рисунка 19 показывает, что характер зависимости МГТУ от нагрузки в целом определяется МГТД (см. рисунок 15). Большой разрыв между линиями $a-a_1$ и $b-b_1$ на рисунке 19а вызван подключением дополнительной турбины установки ОЦР. Поскольку регулирование при винтовом нагружении (у приводных машин) осуществляется за счет уменьшения температуры T_3 , то при номинальных параметрах двигателя температура газов на выхлопе самая большая и соответственно мощность установки ОЦР больше, а эффективность МГТУ – выше. Этим объясняется изменившийся характер кривой ab для МГТУ на базе приводных машин (см. рисунок 15б) по сравнению с изотермическим способом нагружения (см. рисунок 15а).

Результаты исследования комбинированных МГТУ на базе МГТД ПЦ+Р+ПП и ОЦР без регенерации с аммиаком и хладагентом R-134a в качестве рабочих тел (см. рисунок 8) на частичных нагрузках изображены на рисунке 20.

Анализ рисунка 20 показывает, что ввиду наличия регенератора в составе двигателя (см. рисунок 16) эффективность МГТУ существенно зависит от температуры окружающего воздуха особенно для установки с R-134a (см. рисунок 20в). Это связано с тем, что мощности установок ОЦР на R-134a существенно меньше, чем на аммиаке и влияние двигателя на эффективность МГТУ – существенно выше. Этим же объясняется и различие в характере кривых ab для приводных машин (см. рисунок 20б и г).

Результаты исследования комбинированных МГТУ на базе МГТД ПЦ+ТКУ+ПП и ОЦР без регенерации с аммиаком и хладагентом R-134a в качестве рабочих тел (см. рисунок 9) на частичных нагрузках изображены на рисунке 21.

Анализ рисунка 21 показывает, что рассуждения примененные к установке на базе ПЦ+ПП применимы и установке ПЦ+ТКУ+ПП с поправкой на более высокую эффективность.

Результаты исследования комбинированных МГТУ на базе МГТД ПЦ+ТКУ+Р+ПП и ОЦР без регенерации с аммиаком и хладагентом R-134a в качестве рабочих тел (см. рисунок 10) на частичных нагрузках изображены на рисунке 22.

Анализ рисунка 22 показывает, что рассуждения примененные к установке на базе ПЦ+Р+ПП применимы и установке ПЦ+ТКУ+Р+ПП. Также можно отметить более высокое влияние температуры окружающего воздуха на эффективность МГТУ.

В предложенных выше схемах комбинированных МГТУ, использующих МРХ, 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. Наиболее подходящей для этого режима является МГТУ на базе ПЦ, поскольку установка ОЦР на аммиаке может поднять вырабатываемую двигателем среднегодовую мощность на 50 %. Характеристики такой установки на номинальном и переменных режимах для изотермического способа нагружения

представлены на рисунке 23.

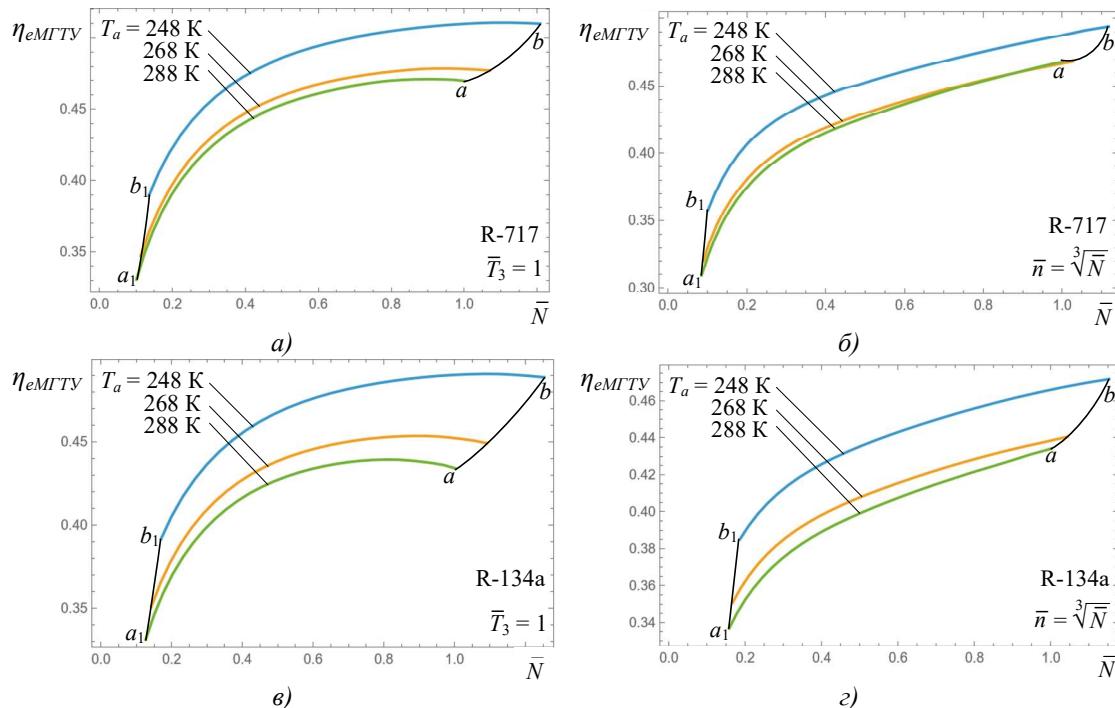


Рисунок 20 – Зависимость КПД МГТУ на базе ПЦ+Р и установкой ОЦР на аммиаке (а, б) и R-134a (в, г) с дополнительной турбиной от относительной мощности и T_a при изотермическом (а, в) и винтовом (б, г) способах нагружения

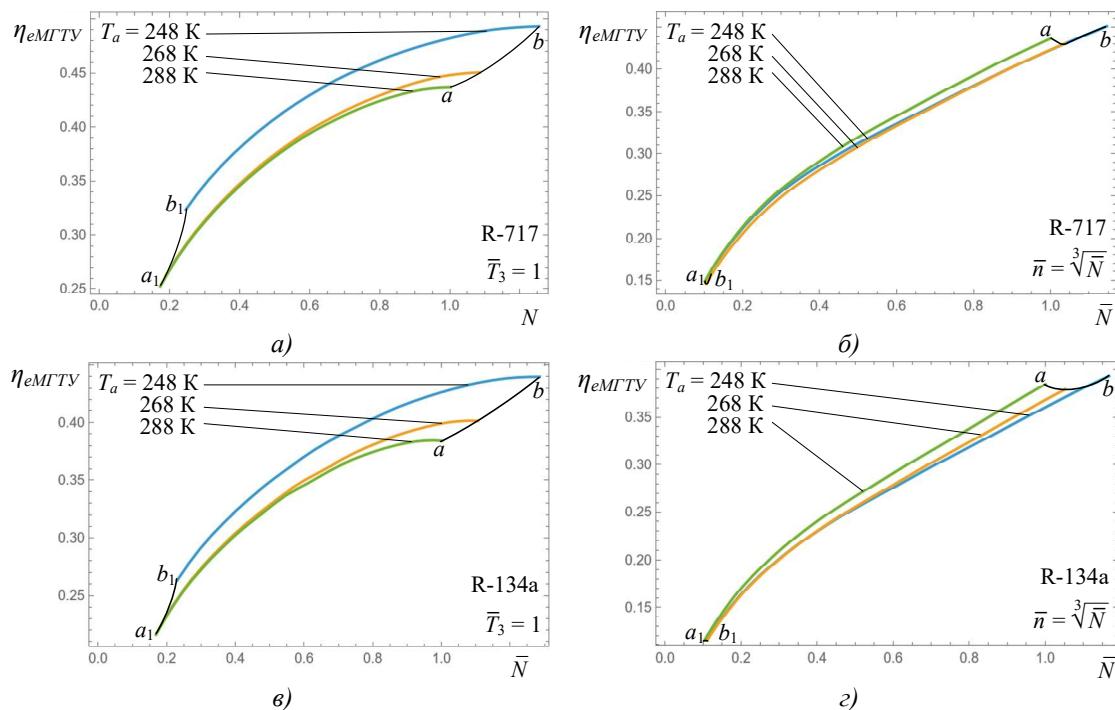


Рисунок 21 – Зависимость КПД МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+ПП и установкой ОЦР на аммиаке (а, б) и R-134a (в, г) с дополнительной турбиной от относительной мощности и T_a при изотермическом (а, в) и винтовом (б, г) способах нагружения

Для остальных установок режим с разделяющимся потоком теплоты целесообразно использовать на номинальном и близким к нему режимах.

На рисунках 23а и б относительная теплота, переданная на теплоснабжение через ОГ2, находится по формуле

$$\bar{q} = \frac{Q}{Q_0},$$

где Q – теплота, переданная на теплоснабжение через ОГ2 или ОГ1 (зависит от схемы МГТД), кДж/кг; Q_0 – теплота, переданная на теплоснабжение через ОГ2 или ОГ1 на номинальном режиме при $g_{oe2} = 1$, кДж/кг.

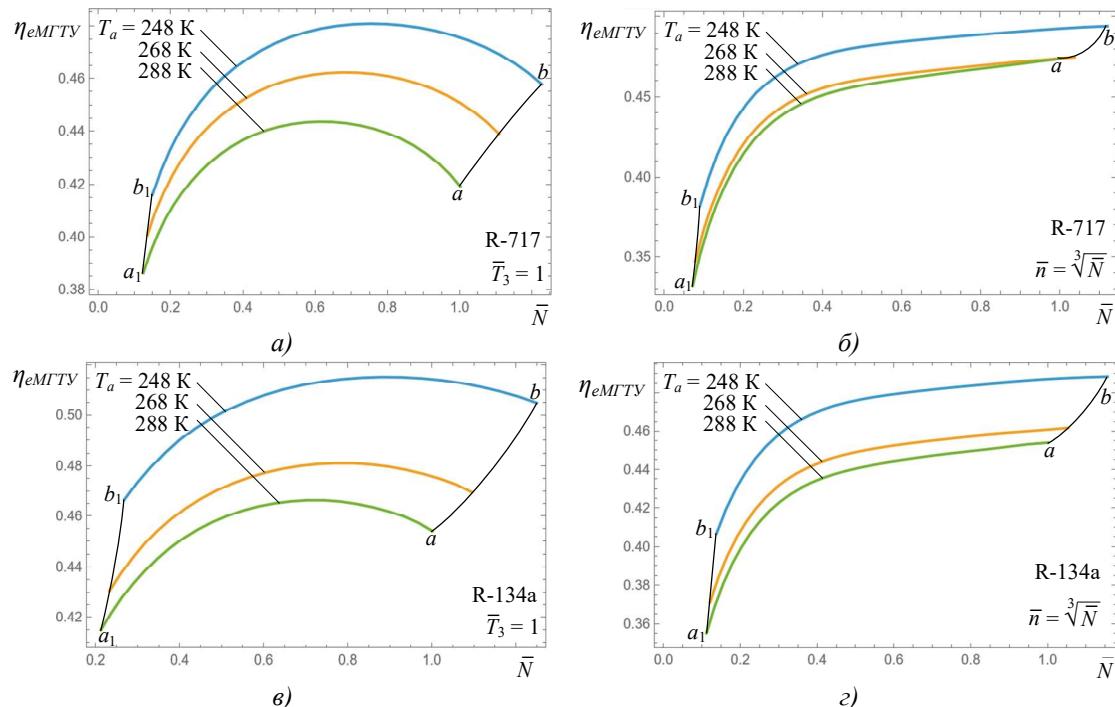


Рисунок 22 – Зависимость КПД МГТУ на базе ПЦ+ТКУ+Р+ПП и установкой ОЦР на аммиаке (а, б) и R-134a (в, г) с дополнительной турбиной от относительной мощности и T_a при изотермическом (а, в) и винтовом (б, г) способах нагружения

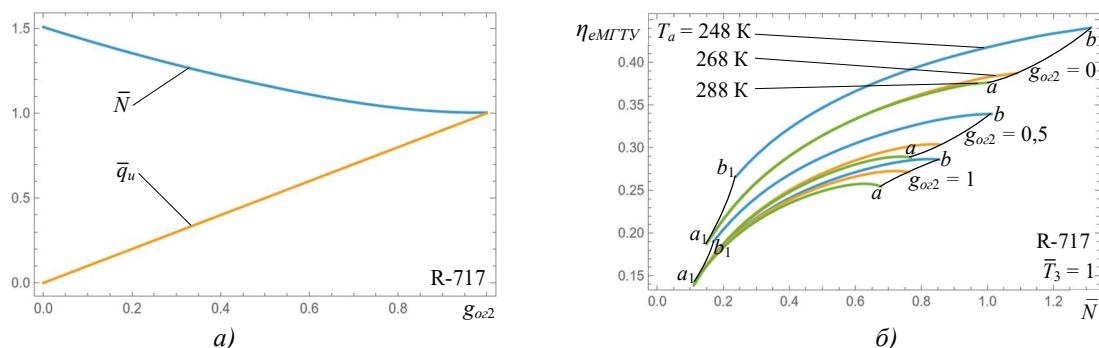


Рисунок 23 – Зависимость параметров комбинированной МГТУ на базе ПЦ+ПП и установки ОЦР с R-717:
а) относительных среднегодовых теплоты, переданной на теплоснабжение и мощности от g_{oe2} ; б)
эффективного КПД на переменных режимах при различных значениях g_{oe2}

Рисунок 22 наглядно показывает, что с ростом g_{oe2} снижается влияние установки ОЦР на эффективность комбинированной МГТУ с ПП, но возрастает количество теплоты, переданной на теплоснабжение объекта. Это позволяет гибко перераспределять энергию цикла в зависимости от текущих потребностей объекта в тепле и электричестве.

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.

Заключение

Проведенные исследования показали:

- Сезонные колебания температуры окружающего воздуха в сибирском регионе Северного морского пути оказывают существенное влияние на эффективность как когенерационных, так и комбинированных МГТУ с ПП, особенно на установки, содержащие регенератор теплоты в составе двигателя.
- Наличие дополнительной турбины в составе установки ОЦР повышает эффективность комбинированных МГТУ с ПП в широком диапазоне нагрузок на различных

режимах нагружения.

3. Использование аммиака в качестве рабочего тела установки ОЦР позволяет добиваться более высокой эффективности по сравнению хладагентом R-134a, и работать в более широком диапазоне нагрузок.

4. Для повышения гибкости комбинированных МГТУ с ПП можно использовать режимы эксплуатации с разделяющимся между установкой ОЦР и котлом-utiлизатором потоком теплоты. Наиболее целесообразной для этих задач является комбинированная установка на базе ПЦ+ПП, поскольку установка ОЦР имеет существенную долю мощности в комбинированной МГТУ и позволяет варьировать отпускаемые потребителю теплоту и электроэнергию в широком диапазоне как на номинальных, так и на переменных режимах при различных способах регулирования. Для остальных схем комбинированных МГТУ с ПП режим с разделяющимся потоком теплоты целесообразно использовать на номинальном и близким к нему режимах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Очеретянный В.А. Гибкие когенерационные технологии на базе энергетических газотурбинных установок / В.А. Очеретянный, В.Т. Матвеенко, А.В. Дологлонян // Комиссия РАН по газовым турбинам, LXV научно-техническая сессия по проблемам газовых турбин и парогазовых установок, 18-19 сентября 2018, С-Пб. С 93-101.
2. Гамаюнов С.Н. Перспективные технологии распределенной энергетики в агробизнесе: монография / С.Н. Гамаюнов. Тверь: ООО «Издательство «Триада», 2011. 160 с.
3. Дологлонян А.В., Матвеенко В.Т., Клименко А.Г. Термодинамические характеристики гибких комбинированных микрогазотурбинных установок на базе двигателей с промподогревом для распределенной энергетики // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2024. № 5 (367). С. 151-163. DOI: 10.33979/2073-7408-2024-367-5-151-163.
4. Патент на изобретение 2762815 Российской Федерации, МПК F01K 25/10. Способ повышения эффективности энергетической установки органического цикла Ренкина с помощью использования климатического ресурса холода / А.В. Дологлонян, В.Т. Матвеенко, И.Н. Стаценко, А.М. Олейников: заявитель и патентообладатель ФГБНУ «Институт природно-технических систем», – № 2021124594, заяв. 18.08.2021; опубл. 23.12.2021, Бюл. № 36.
5. Дологлонян А.В., Матвеенко В.Т., Клименко А.Г. Исследование эффективности установок органического цикла Ренкина при использовании местных климатических ресурсов холода, Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 2 часть 1, С. 145—153. DOI: 10.37220/MIT.2025.68.2.017.
6. Bohn, D. (2005) Micro Gas Turbine and Fuel Cell – A Hybrid Energy Conversion System with High Potential. In *Micro Gas Turbines* (pp. 13-1 – 13-46).
7. Матвеенко В.Т. Глубокая утилизация теплоты в газотурбинных двигателях с турбиной перерасширения / В.Т. Матвеенко // Промышленная теплотехника. – 1997. – Т. 19. – № 4-5. – С. 81-85.
8. Matviinko V. Variable regimes operation of cogenerative gas -turbine engines with overexpansionturbine/ V.Matviinko, V. Ocheretianiy// Procecoligs of ASME Turbo Expo 2010: Power of Land, Sea and Air GT2010, June 14-18, 2010, Glasgow, UK, GT2010-22029.
9. Matvienko V. Gas Turbine Plant with Overexpansion Turbine and Heat Regeneration in the Ship Propulsion Complex / V. Matvienko, O. Andriets, V. Ochretiany // Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: June 16-20, 2014, Dusseldorf, Germany.
10. Matvienko V. Working Process Control in a Ship Gas Turbine Engine of Complex Cycle / V/ Matvienko, V. Ocheretianyi // Procecoling of ASME Turbo Expo 2016: June 13-17, 2016, Seoul, South Korea.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. Арбеков А.Н. Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок / А.Н. Арбеков, А.Ю. Вараксин, Э.А. Мнушин, В.Е и др. М. Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 678 с.
15. Литейные жаропрочные сплавы и технология получения монокристаллических лопаток ГТД / Е.Н. Каблов, Н.Г. Орехов, В.Н. Толорая, И.М. Демонис // Технология легких сплавов. 2002. № 4. С. 100-105.
16. Дологлонян А.В. Оптимизация степени регенерации для циклов микрогазотурбинных установок / А.В. Дологлонян, В.Т. Матвеенко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2020. № 3 (341). С. 59-66.
17. M.J. Moore Micro-turbine generators // Professional Engineering. 2002. Printed in the USA. p.263.
18. Барков, В. В. Выбор параметров и обоснование конструктивной схемы малогабаритной газотурбинной установки с независимым соотношением частот вращения роторов турбины и компрессора: специальность 05.04.12 «Турбомашины и комбинированные турбоустановки»: автореферат диссертации на соискание ученыей степени кандидата технических наук / Барков Виктор Валентинович. Санкт-Петербург, 2017. 22 с.
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.

Дологонян, В.Т. Матвеенко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2019. № 5 (337). С. 139-151.

21. Дологонян А.В. Термодинамические характеристики комбинированных циклов микрогазотурбинных двигателей для распределенной энергетики / А.В. Дологонян, В.Т. Матвеенко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2020. № 4-1 (342). С. 28-41.

22 [Электронный ресурс]. – 2025. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Игарка> (дата обращения 19.04.25).

23. Матвеенко В.Т. Технотехнические характеристики когенерационных газотурбогенераторов с регенерацией теплоты при переменном режиме работы // Авиационно-космическая техника и технология: сб. науч. тр. Харьков: НАУ «ХАИ», 2001 Вып. 23 С. 95-98.

24. Переходные процессы в газотурбинных установках / Под ред. д-ра техн. наук, проф. И. В. Котляра. Л.: Машиностроение. [Ленинград. отд-ние], 1973. 254 с.

25. Дологонян А.В., Матвеенко В.Т., Клименко А.Г. Характеристики когенерационных микрогазотурбинных установок при работе на частичных нагрузках // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2024. № (368). С. 157-173. DOI: 10.33979/2073-7408-2024-368-6-157-173.

26. A Novel Concept for Reducing Water Usage and Increasing Efficiency in Power Generation. Final Report U.S. Department of Energy. National Energy Technology Laboratory. Pittsburgh, PA. March 2004 DOE Award No.: DE-FG26-02NT41544.

27. Ревзин Б.С. Газоперекачивающие агрегаты с газотурбинным приводом. Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2002. 269 с.

28. Дологонян А.В., Матвеенко В.Т., Клименко А.Г. Гибкие комбинированные микрогазотурбинные установки с промподогревом и использованием местных климатических ресурсов холода// Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2025. № 4 (372). С. 99-115.

Дологонян Андрей Вартазарович
ФГБНУ «Институт природно-
технических систем»,
г. Севастополь
заведующий лабораторией,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
доцент
299011, Севастополь, Ленина, 28
e-mail: dologlonyan@mail.ru

Матвеенко Валерий Тимофеевич
ФГБНУ «Институт природно-
технических систем»,
г. Севастополь
доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
профессор
299011, Севастополь, Ленина, 28
e-mail: mvt3900@mail.ru

Клименко Александр Георгиевич
ФГБНУ «Институт природно-
технических систем», г.
Севастополь
ведущий инженер-исследователь
299011, Севастополь, Ленина, 28
e-mail: kag195877@gmail.com

DOLOGLONYAN A.V., MATVIIENKO V.T., KLIMENKO A.G.

STUDY OF FLEXIBLE COMBINED MICRO GAS TURBINE PLANTS WITH INTERMEDIATE HEATING AND USE OF LOCAL CLIMATIC COLD RESOURCES AT PARTIAL LOADS

Abstract. The subject of consideration in the article is the study of combined micro gas turbine plants (MGTP) with intermediate heating (IH) using local climatic cold resources with the help of organic Rankine cycle (ORC) waste heat recovery units at partial loads. The article considers the schemes of combined MGTP with IH and a parallel heat recovery unit containing an ORC unit with an additional (seasonal) turbine and a waste heat boiler providing heat supply to the facility. Ammonia and R-134a refrigerant were used as working fluids in the ORC units, since they provide condensation pressures above atmospheric at low ambient temperatures. It was found that seasonal fluctuations in ambient air temperature in the Siberian region of the Northern Sea Route have a significant impact on the efficiency of both cogeneration and combined MGTP with IH, especially on plants containing a heat regenerator as part of the engine. It is shown that the presence of an additional turbine in the ORC unit increases the efficiency of combined MSTPs in a wide range of loads under various loading conditions.

Keywords: microgas turbine plant, heat recovery, overexpansion turbine, turbocharger utilizer, organic Rankine cycle, additional turbine, working fluid, cold climate resource, partial loads, intermediate heating.

BIBLIOGRAPHY

1. Ocheretyanyj V.A. Gibkie kogeneracionnye tekhnologii na baze energeticheskikh gazoturbinnih ustanovok / V.A. Ocheretyanyj, V.T. Matveenko, A.V. Dologlonyan // Komissiya RAN po gazovym turbinam, LXV nauchno-tehnicheskaya sessiya po problemam gazovyh turbin i parogazovyh ustanovok, 18-19 sentyabrya 2018, S-Pb. Pp. 93-101.

2. Gamayunov S.N. Perspektivnye tekhnologii raspredelennoj energetiki v agrobiznese: monografiya / S.N. Gamayunov. Tver: OOO «Izdatelstvo «Triada», 2011. 160 p.

3. Dologlonyan A.V., Matveenko V.T., Klimenko A.G. Termodinamicheskie harakteristiki gibkih kombinirovannyh mikrogazoturbinnih ustanovok na baze dvigatelej s prompodogrevom dlya raspredelennoj energetiki // Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. Orel: OGU im. I.S. Turgeneva, 2024. № 5 (367). Pp. 151-163. DOI: 10.33979/2073-7408-2024-367-5-151-163.

4. Patent na izobretenie 2762815 Rossiskaya Federaciya, MPK F01K 25/10. Sposob povysheniya effektivnosti energeticheskoy ustanovki organicheskogo cikla Renkina s pomoshchyu ispolzovaniya klimaticheskogo resursa holoda / A.V. Dologlonyan, V.T. Matveenko, I.N. Stacenko, A.M. Olejinikov: zayavitel i patentobladatel FGBNU «Institut prirodno-tehnicheskikh sistem», – № 2021124594, zayav. 18.08.2021; opubl. 23.12.2021, Byul. № 36.

5. Dologlonyan A.V., Matveenko V.T., Klimenko A.G. Issledovanie effektivnosti ustanovok organicheskogo

- cikla Renkina pri ispolzovanii mestnyh klimaticheskikh resursov holoda, Morskie intellektualnye tekhnologii. 2025. № 2 chast 1, p. 145—153. DOI: 10.37220/MIT.2025.68.2.017.
6. Bohn, D. (2005) Micro Gas Turbine and Fuel Cell – A Hybrid Energy Conversion System with High Potential. In Micro Gas Turbines (pp. 13-1 – 13-46).
7. Matveenko V.T. Glubokaya utilizaciya teploty v gazoturbinnih dvigateleyah s turbinoj pererasshireniya / V.T. Matveenko // Promyshlennaya teplotekhnika. – 1997. – T. 19. – № 4-5. – Pp. 81-85.
8. Matviinko V. Variable regimes operation of cogenerative gas -turbine engines with overexpansionturbine/V.Matviinko, V. Ocheretiany// Procecoligs of ASME Turbo Expo 2010: Power of Land, Sea and Air GT2010, June 14-18, 2010, Glasgow, UK, GT2010-22029.
9. Matviienko V. Gas Turbine Plant with Overexpansion Turbine and Heat Regeneration in the Ship Propulsion Complex / V. Matviienko, O. Andriets, V. Ochretiany // Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: June 16-20, 2014, Dusseldorf, Germany.
10. Matviienko V. Working Process Control in a Ship Gas Turbine Engine of Complex Cycle / V/ Matviienko, V. Ocheretiany // Procecoling of ASME Turbo Expo 2016: June 13-17, 2016, Seoul, South Korea.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. Arbekov A.N. Teoriya i proektirovaniye gazoturbinnih i kombinirovannyh ustanovok / A.N. Arbekov, A.YU. Varaksin, E.A. Mnushin, V.E i dr. M. Izdatelstvo MGTU im. N.E. Baumana, 2017. 678 p.
15. Litejnye zharoprochnye splavy i tekhnologiya polucheniya monokristallicheskikh lopatok GTD / E.N. Kablov, N.G. Orekhov, V.N. Toloraiya, I.M. Demonis // Tekhnologiya legkih splavov. 2002. № 4. Pp. 100-105.
16. 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). Pp. 59-66.
17. M.J. Moore Micro-turbine generators // Professional Engineering. 2002. Printed in the USA. p.263.
18. Barskov, V. V. Vybor parametrov i obosnovanie konstruktivnoj skhemy malogabaritnoj gazoturbinnoj ustanovki s nezavisimym sootnosheniem chasot vrashcheniya rotorov turbiny i kompressora: specialnost 05.04.12 «Turbo mashiny i kombinirovannye turboustanovki»: avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk / Barskov Viktor Valentinovich. Sankt-Peterburg, 2017. 22 p.
19. [Elektronnyj resurs]. – 2019. – URL: <https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/> (data obrashcheniya 31.05.19).
20. Dologlonyan A.V. Vybor rabochego tela i optimizaciya parametrov organiceskogo cikla Renkina / A.V. Dologlonyan, V.T. Matveenko // Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. Orel: OGU im. I.S. Turgeneva, 2019. № 5 (337). Pp. 139-151.
21. Dologlonyan A.V. Termodynamicheskie harakteristiki kombinirovannyh 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). Pp. 28-41.
- 22 [Elektronnyj resurs]. – 2025. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Igarka/> (data obrashcheniya 19.04.25).
23. Matveenko V.T. Teplotekhnicheskie harakteristiki kogeneracionnyh gazoturbogeneratorov s regeneracijey teploty pri peremennom rezhime raboty // Aviacionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya: cb. nauch. tr. Harkov: NAU «HAI», 2001 Vyp. 23 S. 95-98.
24. Perekhodnye processy v gazoturbinnih ustanovkah / Pod red. d-ra tekhn. nauk, prof. I. V. Kotlyara. L.: Mashinostroenie. [Leningr. otd-nie], 1973. 254 p.
25. Dologlonyan A.V., Matveenko V.T., Klimenko A.G. Harakteristiki kogeneracionnyh mikrogazoturbinnih ustanovok pri rabote na chasticchnyh nagruzkah // Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. Orel: OGU im. I.S. Turgeneva, 2024. № (368). Pp. 157-173. DOI: 10.33979/2073-7408-2024-368-6-157-173.
26. A Novel Concept for Reducing Water Usage and Increasing Efficiency in Power Generation. Final Report U.S. Department of Energy. National Energy Technology Laboratory. Pittsburgh, PA. March 2004 DOE Award No.: DE-FG26-02NT41544.
27. Revzin B.S. Gazoperekachivayushchie agregaty s gazoturbinnym privodom. Ekaterinburg, UGTU-UPI, 2002. 269 s.
28. Dologlonyan A.V., Matveenko V.T., Klimenko A.G. Gibkie kombinirovannye mikrogazoturbinnye ustanovki s prompodogrevom i ispolzovaniem mestnyh klimaticheskikh resursov holoda// Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. Orel: OGU im. I.S. Turgeneva, 2025. № 4 (372). Pp. 99-115.

Dologlonyan Andrey Vartazarovich
Institute of Nature and Technical Systems, Sevastopol
Candidate of Technical Sciences, Chief of Laboratory, Leading Researcher, Assistant Professor
299011, Sevastopol, Lenina St., 28
e-mail: dologlonyan@mail.ru

Matveenko Valeriy Timofeevich
Doctor of Technical Sciences, Chief Scientist, Professor,
299011, Sevastopol, Lenina St., 28
e-mail: mvt3900@mail.ru

Klimenko Alexander Grigorevich
Institute of Nature and Technical Systems, Sevastopol
Lead Research Engineer,
299011, Sevastopol, Lenina St., 28
e-mail: kag195877@gmail.com

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

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИОННОГО ОТЖИГА ДЛЯ ЛЕНТ ИЗ ЛЕГИРОВАННОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ МЕДЬ – НИКЕЛЬ – АЛЮМИНИЙ

Аннотация. Исследовано влияние рекристаллизационного отжига на структуру и механические свойства лент из сплава на основе Cu-Ni-Al, дополнительного легированного Cr и Si. Показано, что технологический отжиг для снятия напряжений при холодной прокатки лент из рассматриваемого сплава, может быть использован как замена закалки.

Ключевые слова: обработка металлов давлением, пружинные сплавы цветных металлов, сплав 131, бронза марки БрБ2, механические испытания, старение, отжиг, закалка.

Введение

Разработка сплавов цветных металлов, обладающих пружинными свойствами, активно велась в нашей стране и за рубежом, в первую очередь как аналоги и (или) замена для сплава БрБ2 и его производных. Последнее связано с относительным дефицитом бериллия и его токсичностью. В нашей стране были разработаны сплавы, представленные в таблице 1 [1-4] (химический состав БрБ2 приведен для сравнения). Видно, что основой являлась тройная система Cu-Ni-Al (куниали) с легированием хромом, марганцем, кремнием и цинком.

Таблица 1 – Химический состав пружинных сплавов цветных металлов

Марка сплава	Основные компоненты							
	B	Ni	Al	Cr	Mn	Si	Zn	Cu
Куниаль А	-	12-15	2,3-3,0	-	-	-	-	ост.
Куниаль Б	-	5,5-6,5	1,2-1,8	-	-	-	-	ост.
Камелон	-	18-22	3,8-4,2	2,7-3,1	3,8-4,2	-	-	ост.
Камелин	-	4,5-4,9	4,5-4,9	0,7-1,0	2,5-3,0	-	-	ост.
Камвлон	-	18-22	3,8-4,2	2,7-3,1	3,8-4,2	-	-	ост.
538	-	13-15	3,3-3,7	1,7-2,1	2,7-3,2	-	-	ост.
156	-	2,0-3,0	1,6-2,2	-	0,3-0,7	1,6-2,2	ост.	73-76
131	-	10,0-11,0	2,3-2,7	0,6-1,0	-	0,3-0,7	-	ост.
БрБ2	1,8-2,1	0,2-0,5(+Co)	-	-	-	-	-	ост.

Химический состав куниалей А и Б, 156 сплава (ЛАНКМц 75-2-2,5-0,5-0,5) регламентированы ГОСТами, что говорит о широкой практики их использования, которая на данном этапе развития производства ограничена. Для остальных материалов регламентирующими документами являются только ТУ и практическое их использование в приборостроении существенно ограничено. Во многом это связано с прекращением работ по совершенствованию технологии производства рассматриваемых материалов, как отражение технологического упадка в период 1991-1999гг. Параллельно легированные сплавы, на основе системы Cu-Ni-Al, проигрывают конкуренцию материалам на основе Cu-Be в силу исторического более широкого распространения последних и несовершенных технологий производства легированных куниалей, что отражается на себестоимости. Однако, куниали способны выдерживать более высокие температуры до 250°C (кратковременно до 550°C), в отличии от БрБ2, чей предел 150°C [4]. Так же системы Cu-Ni-Al способны работать в активных средах, вызывающих коррозию. Указанные обстоятельства и продолжение работ по улучшению технологии производства легированных и чистых куниалей позволит в дальнейшем обеспечить их более широкое применение в качестве конструкционных и приборных элементов в различных отраслях машиностроения в Российской Федерации.

Постановка задачи

Для достижения технологичности и наилучших показателей сплавы, приведённые в таблицы 1, подвергают термической обработке: закалки в воду или на воздух и старению по аналогии с БрБ2 [5].

Механизм упрочнения для чистых куниалей достигается за счет выделения дисперсных частиц интерметаллидных фаз Ni_3Al или $NiAl$ [3]. Марганец в рассматриваемых сплавах не образует самостоятельной фазы [4] и введен для повышения прокаливаемости. Хром вводится для повышения технологических характеристик и улучшает показатели назначения [3-4]. Вшедший в твёрдый раствор хром обеспечивает упрочнение при дисперсионном твердении и повышает упругие свойства, а самостоятельные частицы повышают теплостойкость. Цинк образует с медью твердый раствор и имеет однофазную структуру [3-4]. Влияние кремния существенно зависит от температуры закалки - при $850^{\circ}C$ не образуется самостоятельных фаз, с понижением температуры образуются структуры типа Ni_2Si или $Ni_3(SiMn)$ [4]. Таким образом, для рассматриваемых в таблице 1 сплавов, механизм термического упрочнения сложный процесс, связанный с различным влиянием на систему Cu-Ni-Al легирующих элементов. Так же методы плавления и технологический процесс получения полос и лент из данных материалов влияют на финальные эксплуатационные показатели.

Если старение можно проводить в защитной среде или в вакууме и его температуры незначительны, то закалка связана с контактом со средой, содержащей кислород и образованием окалины. В итоге получаемая поверхность (а основными продуктами являются полосы, ленты и фольга) требует дополнительных технологических операций – зачистки щетками, пескоструйной обработки, травлению и т.д. Указанные операции непросто подвергаются автоматизации, а при малых партиях и вовсе являются ручными, что существенно отражается на себестоимости готового проката. Кроме того, удаление окалины – это необходимый процесс, который приводит к безвозвратным потерям материала. Поэтому, для снижения себестоимости, улучшения технологичности необходимо операцию закалки (которую проводят для снятия напряжений при холодной прокатки) заменить на процедуры отжига в защищенных средах или вакууме.

Исследование

Из совокупности материалов в таблице 1, для исследования выберем сплав 131 [1], который предназначен для токоведущих пружин [4] и других ответственных упругих элементов, что определяет его как замену БрБ2, или как лучший аналог для работы при повышенных температурах. Сплав был разработан в 1969 г., авторское свидетельство опубликовано в 1977 г. [1], технические условия на ленту были утверждены в 1980г., а на проволоку в 1990г. в стенах института «Гипроцветметобработка». В настоящие времена материал производится наследником структур института и его экспериментального завода (ЭЗКС) – ООО «Мценскпрокат», который выпустил и согласовал актуальную версию ТУ на ленты. Технология включает промежуточные закалки, что влечет трудности последующего удаления окалины, особенно в размерах менее 1мм. В тоже время в 1988г. институтом «Гипроцветметобработка» был предложен режим рекристаллизационного отжига, который в практику производства не был внедрен. Для исследования отливались слитки в изложницы размером 80x260мм по следующей шихтовке: медь марки М00к – 76,40кг, никель марки Н1 – 9,45кг, кремний марки Кр0 – 1,0кг, хром марки БдХ0 – 0,9кг и лигатура МФ10 – 0,07кг. Плавка велась в открытой индукционной печи. В итоге получили слитки с химией представленной в таблице 2.

Микротвердость литого слитка $HV = 256,40$, структура представлена на рисунке 1. Тут и далее для травления использовали: 3% $FeCl_3$ в 10% водном растворе HCl в течении 90с, затем 3% $CuSO_4$ в 10% водном растворе аммиака в течении нескольких секунд. Горячую прокатку осуществляли по схеме: нагрев заготовок в толщине 60мм, при температуре $900^{\circ}C$, выдержка 1,5 часа, далее прокатка 60,0-50,0-40,0мм, подогрев 1 час и деформация по следующим переходам 40,0-35,0-30,0-25,0-20,0-25,0-20,0-15,0-10,0-7,0-4,5мм.

Таблица 2 – Химический состав исследуемых образцов, %

Химический элемент	Cu	Ni	Fe	C	Si	Mn	Al	Cr	Сумма примесей
фактический состав плавка №2144	ост.	10,4	0,09	0,02	0,9	0,007	2,35	0,70	0,13
фактический состав плавка №2145	ост.	10,5	0,08	0,02	1,15	0,008	2,30	0,75	0,13
требования ТУ 24.44.2-001-28256296-2023	ост.	10,0-11,0	не более 0,10	не более 0,02	0,8-1,2	не более 0,01	2,3-2,7	0,6-1,0	не более 0,5



Рисунок 1 – Структура литого слитка из сплава 131 (увеличение x100)

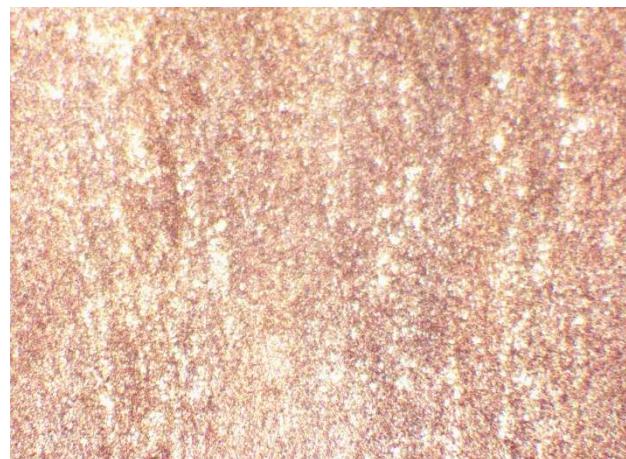


Рисунок 2 – Структура сплава 131 после горячей деформации с 60мм до 4,5мм и закалки в воду (увеличение x100)

Далее произвели закалку в воду с температуры 850°C, выдержка 1,5 часа (далее режим закалки аналогичен), и очистку полос от окалины пескоструйной обработкой. Микротвердость полученной полосы в толщине 4,5мм HV = 233,33, структура представлена на рисунок 2, 3, при разных увеличениях. На рисунок 3 обращают на себя внимание круглые нерастворённые частицы, по данным [4 стр. 68] это твердый раствор на основе хрома (более 90%) с о.ц.к. решеткой, с периодом 0,288нм. Затем проводили холодную прокатку (двуихвалковый стан с диаметром валков 650мм) полос по схеме: 4,5-3,8-3,1-2,1-1,70-1,50-1,35мм, с получением следующих механических свойств: HV=255,00, $\delta_p = 1,25\%$, $\sigma_B = 805,53\text{МПа}$, $\sigma_{0,2} = 803,67\text{МПа}$ (тут и далее в терминах и определениях по ГОСТ 1497-2023). Структура представлена на рисунок 4, видно сферические частицы не поменяли свою конфигурацию и по-прежнему равномерно распределены. Данную полосу в первом варианте подвергли закалке по рассмотренному ранее режиму и получили: HV=130,47, $\delta_p = 24,0\%$, $\delta = 52,62\%$, $\sigma_B = 512,05\text{МПа}$, $\sigma_{0,2} = 237,93\text{МПа}$, при этом значения заявляемые в [1] следующие: HV=120,0, $\sigma_B = 55\text{кгс}/\text{мм}^2$, $\delta = 55,0\%$. Во втором варианте полосу подвергли отжигу в вакуумной печи по режиму 700°C с выдержкой 3 часа (см. рисунок 5, 6, структуру см. рисунок 7) и получили: HV=161,57, $\delta_p = 13,2\%$, $\delta = 25,14\%$, $\sigma_B = 502,31\text{МПа}$, $\sigma_{0,2} = 292,03\text{МПа}$.

По рисунок7 видно, что структура - твердый раствор на основе хрома имеет существенно меньшие размеры, а зерна выросли и обладают ярко выраженной границей. Полученные ленты прокатывали на двухвалковом стане с диаметром валков 210мм и передним натяжением по схеме: 1,35-1,25-1,0-0,9-0,8-0,7-0,6-0,5-0,4мм и получили следующие механические свойства HV=234,63, $\delta_p = 3,0\%$, $\delta = 4,55\%$, $\sigma_B = 800,27\text{МПа}$, $\sigma_{0,2} = 694,32\text{МПа}$. (структуре см. рисунок 8).

Для сравнения ленту в 0,4мм закаливали и отжигали по режимам, приведённым выше, далее для простоты сведем данные в табличный вид (см. таблицы 3). Все операции для получения ленты в толщине 0,15мм аналогичны, только прокатка осуществляется на стане квартро с диаметром рабочих валков 110мм.

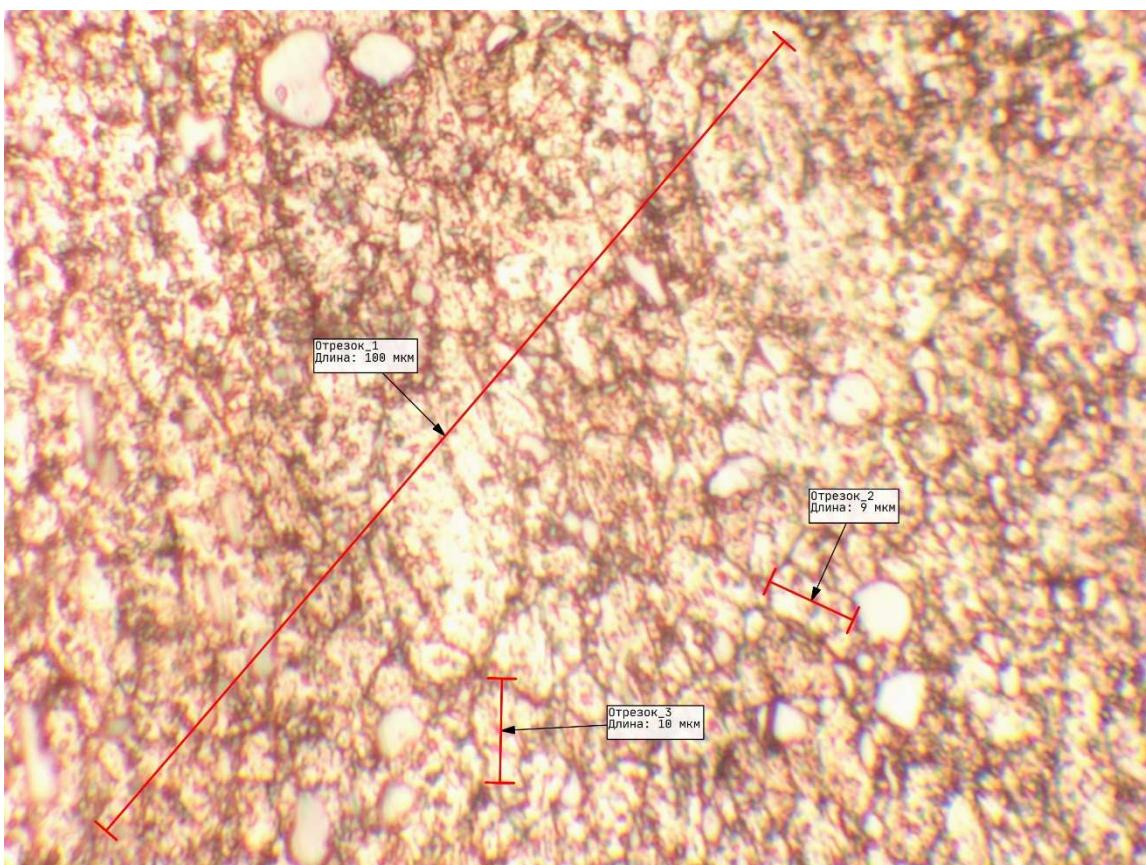


Рисунок 3 – Структура сплава 131 после горячей деформации с 60мм до 4,5мм и закалки в воду (увеличение x1000)

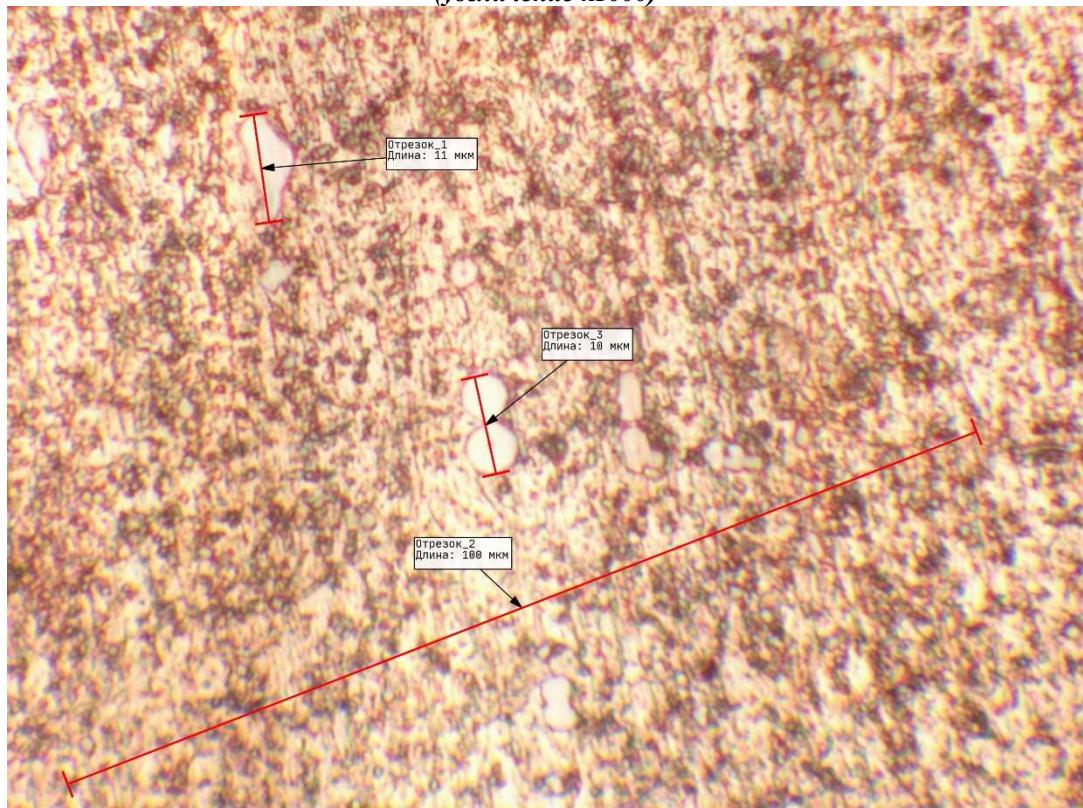


Рисунок 4 – Структура сплава 131 после холодной деформации на 70% с 4,5мм до 1,35мм (увеличение x1000)



Рисунок 5 – Вакуумная печь для отжига ZTH-200

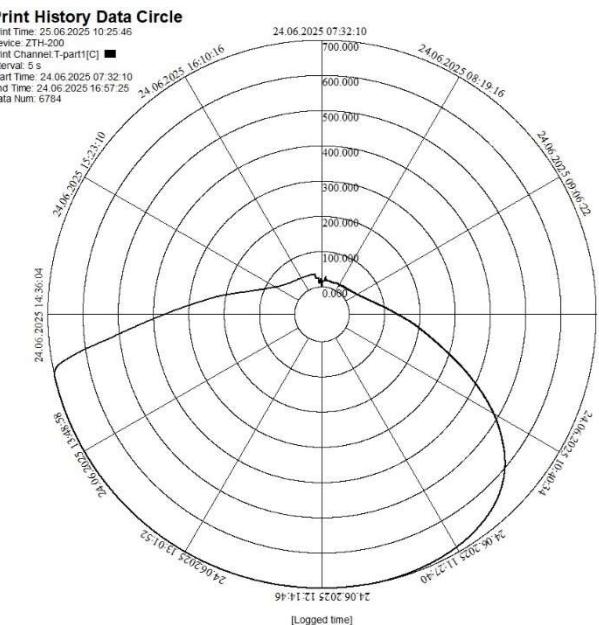


Рисунок 6 – Диаграмма отжига сплава 131 в вакуумной печи

Таблица 3 – Механические свойства лент

Параметр	Толщина ленты							
	1,35мм			0,4мм			0,15мм	
	$\varepsilon=70\%$	закалки	отжига	$\varepsilon=70\%$	закалки	отжига	$\varepsilon=70\%$	Старение60/35
<i>HV</i>	255,00	130,47	161,57	234,63	134,90	150,00	220,47	282,50/256,30
δ_P , %	1,25	24,00	13,20	3,00	35,23	15,70	2,00	9,50/6,90
δ , %	12,26	52,62	25,14	4,55	36,68	22,54	2,27	12,57/12,38
σ_B , %	805,53	512,05	502,31	800,27	497,30	506,88	767,48	841,80/835,20
$\sigma_{0,2}$, %	803,67	292,03	292,03	694,32	235,01	144,61	709,16	531,98/642,73

Структура ленты после деформации приведена на рисунок 8, после закалки на рисунок 9, а после отжига на рисунок 10, для размера 0,4мм. Наблюдаемые картины схожи, за исключением формы твердого раствора хрома. После отжига данное выделение в большем своем количестве существенно отлично от округлой формы (см. рисунок 9 и 10).

Ленты в готовом размере 0,15мм подвергали закалке с 950°C и выдержкой 1,5 часа, старению по режиму 500°C (посадка в нагретую печь) в течении 35мин и 60 мин, выбор температур обусловлен рекомендацией [4 стр. 78]. Если ленты подвергнуть старению (500°C посадка в нагретую печь в течении 35мин) после деформации 70% без предварительной закалки, то значение твердости будет 178,13.

В целом изменения параметры закалки перед старением и температурно-временные характеристики самого финального технологического процесса можно получить требуемые свойства в широком диапазоне значений, в том числе до твердости 345 [1, 4].

По данным таблицы 3 видно, что преимущество закалки в большем удлинении, однако и после рекристаллизационного отжига ленты хорошо деформируются на 50-70%. При этом силовые параметры холодной прокатки идентичны, так как значения временного сопротивления и условного предела текучести для различных вариантов термической обработки близки.

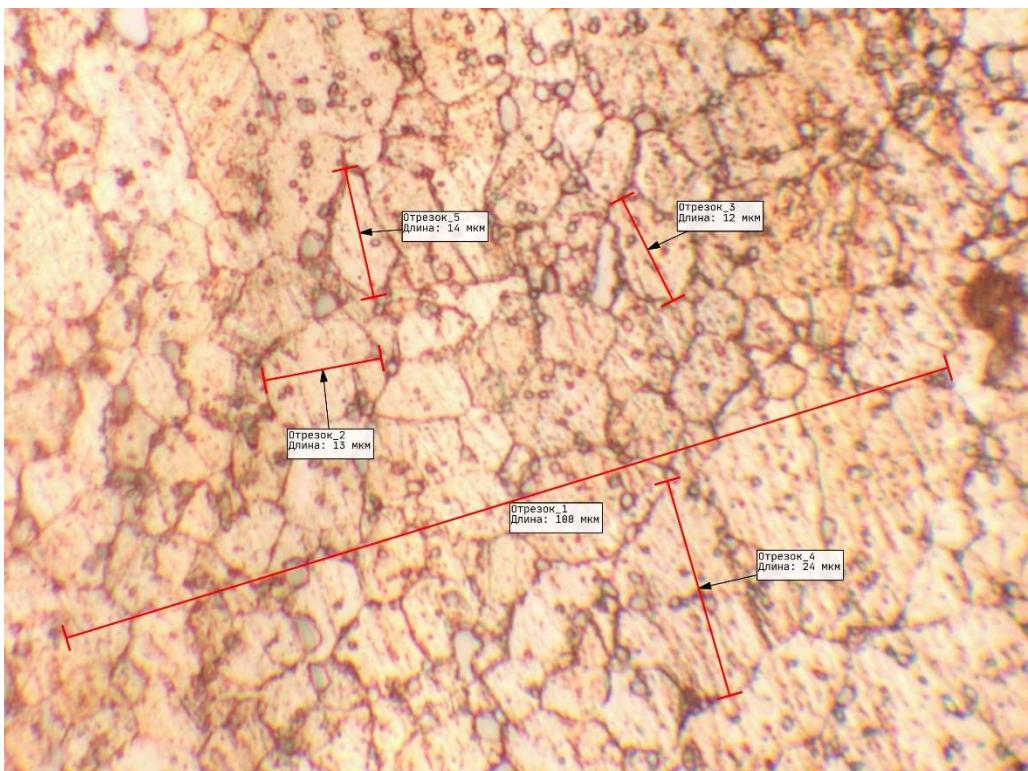


Рисунок 7 – Структура сплава 131 после отжига в вакууме по режиму на рисунок 4 (увеличение $\times 1000$)

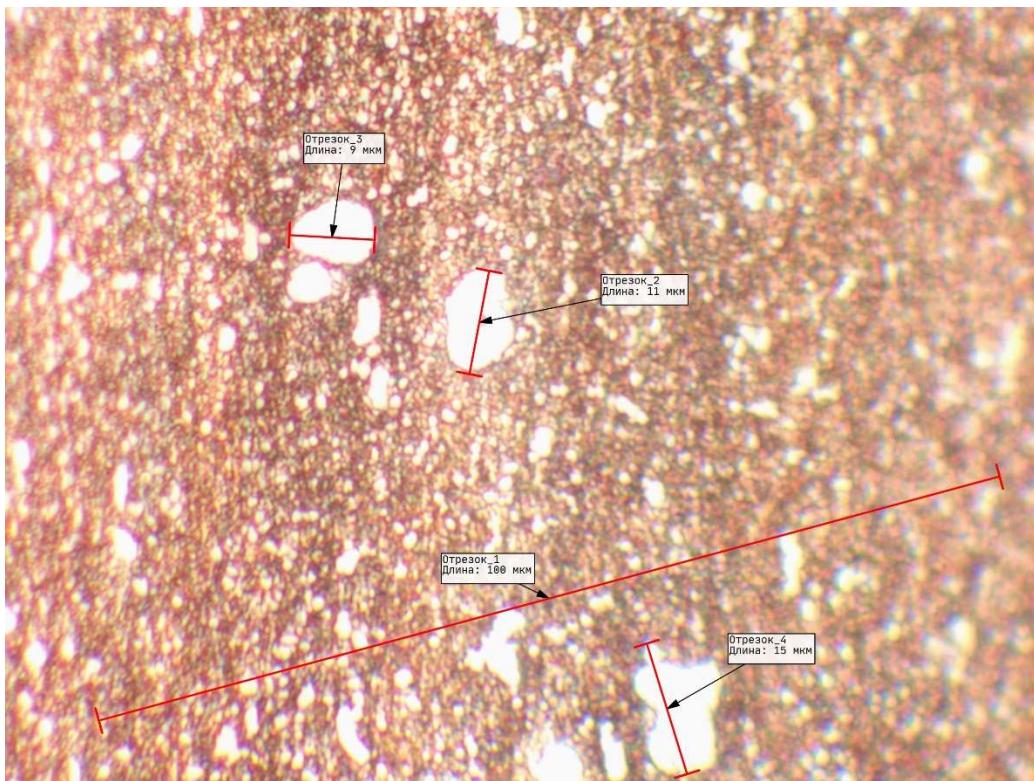


Рисунок 8 – Структура сплава 131 после холодной деформации на 70% с 1,35 мм до 0,4мм (увеличение $\times 1000$)

Заключение

На основе анализа структуры лент и их механических свойств доказано, что рекристаллизационный отжиг между операциями холодной прокатки может заменить процедуру закалки для сплава системы Cu-Ni-Al, дополнительного легированного Cr и Si. Данная замена целесообразна, так как отжиг имеет преимущество – не требуется дополнительная зачистка поверхности проката.

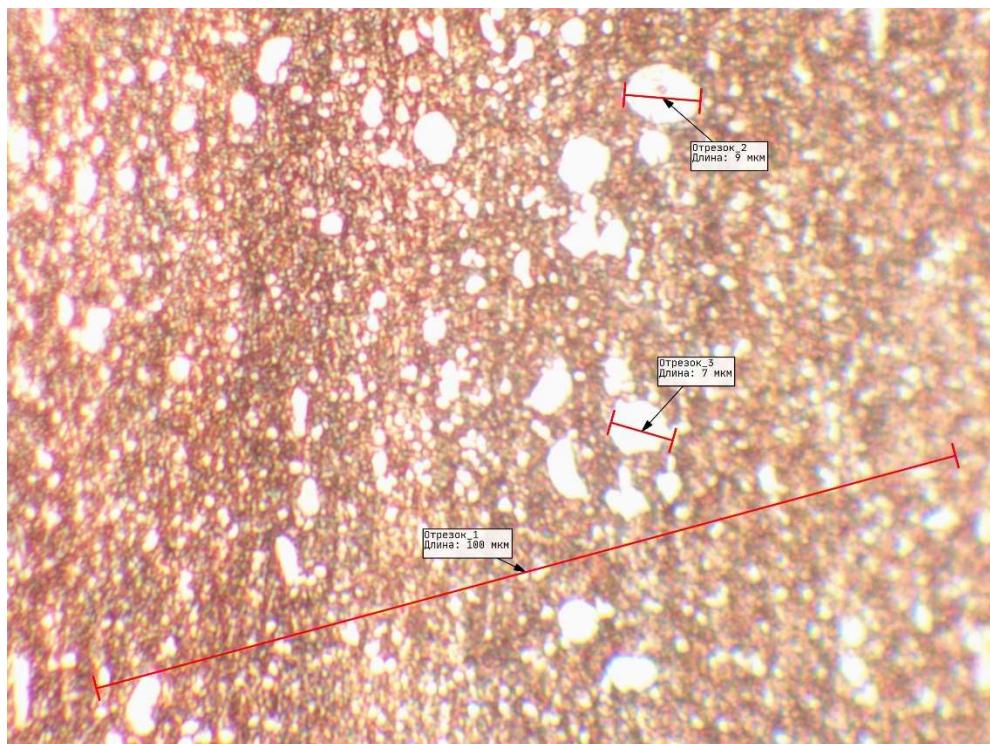


Рисунок 9 – Структура сплава 131 после холодной деформации на 70% и закалки (увеличение $\times 1000$), толщина 0,4мм

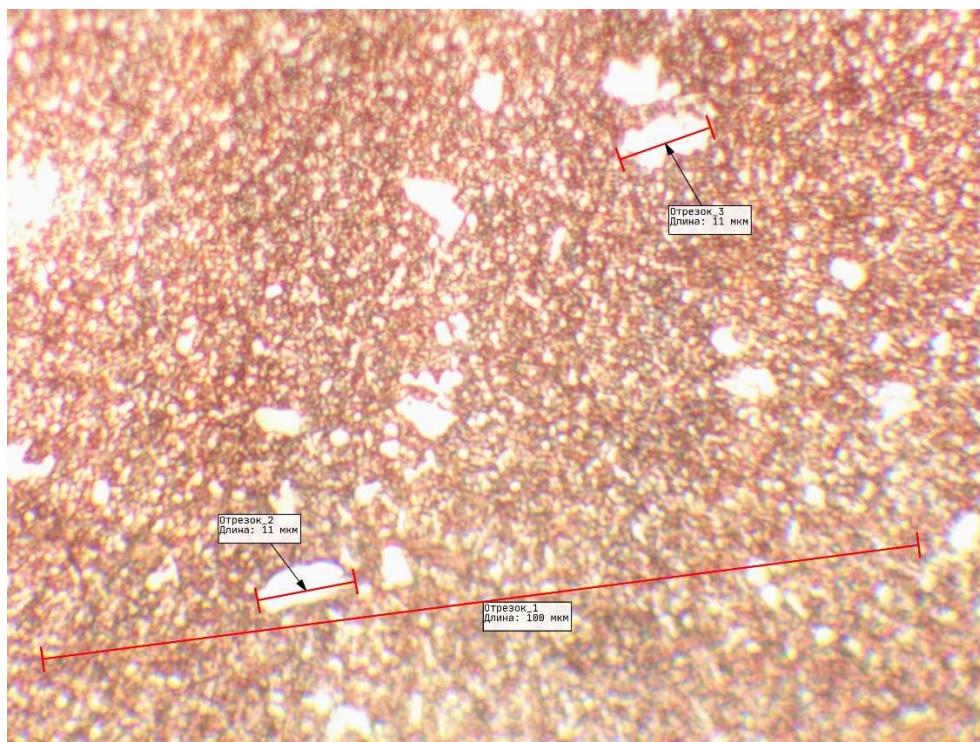


Рисунок 10 – Структура сплава 131 после холодной деформации на 70% и отжига (увеличение $\times 1000$), толщина 0,4мм

Так же интерес представляет собой продолжение работ по улучшению технологий производства и исследования структуры легированных сплавов системы куниалей: рассмотренного сплава 131 и сплава 156, как имеющего применение. Так же исходя из приведённых данных, следует рассмотреть вопрос и произвести ряд экспериментальных работ по возможности отжига сплава БрБ2, как технологической операции для снятия напряжений вместо закалки (возможность рекристаллизационного отжига описана стр. 24 [2]), по аналогичным причинам, что и для сплава 131.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сплав на основе меди: а.с. 461652 СССР. № 1366041/22-01 / Розенберг В.М., Горячева К.А., Черникова А.В. и др.; заявл. 06.10.69, опубл. 25.11.77, Бюл. 43.
2. Пастухова, Ж. П. Пружинные сплавы цветных металлов / Ж. П. Пастухова, А. Г. Раухштадт. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва: Металлургия, 1984. - 363 с.
3. Осинцев, О. Е. Медь и медные сплавы : отечественные и зарубежные марки : справочник / О. Е. Осинцев, В. Н. Федоров. — Москва : Машиностроение, 2004. — 336 с.
4. Розенберг, В.М. Диаграммы изотермического распада в сплавах на основе меди: Справочник. Розенберг В.М., Дзутцев В.Т. – М.:Металлургия, 1989. – 326 с.
5. Исследование вакуумного старения тонких лент из бериллиевой бронзы [Текст] / Голенков В.А., Радченко С.Ю., Д.О. Дорохов // «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева, № 6(368). – 2024г.

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

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

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

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

RESEARCH OF RECRYSTALLIZATION ANNEALING FOR BANDS OF ALLOYED ALUMINIUM SYSTEM COPPER – NICKEL – ALUMINIUM

Annotation. The effect of recrystallization annealing on the structure and mechanical properties of ribbons made of a Cu-Ni-Al alloy, additionally alloyed with Cr and Si, has been studied. It has been shown that technological annealing can be used to relieve stresses during cold rolling of ribbons made of this alloy, as a substitute for quenching.

Keywords: metal forming, spring alloys of non-ferrous metals, alloy 131, bronze of grade CuB2, mechanical testing, aging, annealing, and quenching.

BIBLIOGRAPHY

1. Copper-based alloy: USSR Patent No. 461652. No. 1366041/22-01 / Rosenberg V.M., Goryacheva K.A., Chernikova A.V. et al.; appl. 06.10.69, publ. 25.11.77, Bull. 43.
2. Pastukhova, Zh. P. Spring alloys of non-ferrous metals / Zh. P. Pastukhova, A. G. Rakhshtadt. - 2nd ed., revised and expanded. - Moscow: Metallurgy, 1984. - 363 p.
3. Osintsev, O. E. Copper and Copper Alloys : Domestic and Foreign Brands : Handbook / O. E. Osintsev, V. N. Fedorov. — Moscow : Mechanical Engineering, 2004. — 336 p.
4. Rosenberg, V.M. Diagrams of Isothermal Decay in Copper-Based Alloys: Handbook. Rosenberg V.M., Dzutsev V.T. – M.: Metallurgy, 1989. – 326 p.
5. Research of vacuum aging of thin tapes from beryllium bronze [Text] / Golenkov V.A., Radchenko S.Yu., D.O. Dorokhov // "Fundamental and applied problems of engineering and technology". – Orel: OSU named after I.S. Turgenev, No. 6(368). — 2024.

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

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

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

НИЗМЕЕВ А.А., ДОРОХОВ Д.О.

ПРИМЕНЕНИЕ РАДИАЛЬНО-ОБЖИМНЫХ БОЙКОВ ДЛЯ КОНЦЕВОЙ ЗАДЕЛКИ ТРОСОВ МЕТОДОМ ОПРЕССОВКИ

Аннотация. В статье описана возможность применения радиально-обжимных бойков для концевой заделки тросов опрессовкой в условиях мелкосерийного производства. На основе имеющегося опрессовочного станка разработан комплект специальных кулачков, позволяющих выполнять сборочную операцию опрессовкой, а также описана маршрутная технология изготовления кулачков и предлагаемая последовательность сборки троса. При этом в отличие от базовой технологии, применение опрессовки позволит повысить производительность, улучшить показатели надежности и прочности троса и исключит необходимость работы с опасными веществами.

Ключевые слова: радиально-обжимной боек, кулачок для опрессовки, трос, конвейер, опрессовочный станок, прессовый блок, маршрутная технология, производительность.

Введение

В ряде работ, посвященных технологиям радиального обжатия отмечено, что данным способом можно выполнять некоторые сборочные операции, в частности запрессовка канатов в скобы кабеля, закрепление сверл в хвостовике, опрессовка ниппелей и фитингов на стальных кабелях и проволочных тросах, посадка втулок с натягом и т.д. [1]. Характерной особенностью процесса ротационного и радиального обжатия является прерывистая ударная нагрузка часто повторяющимися циклами, которая по сравнению с непрерывным нагружением позволяет увеличить пластичность труднодеформируемых сплавов в 2,5-3 раза [2].

При этом бойки, применяемые для радиального обжатия, конструктивно близки с кулачками для радиально-опрессовочных станков. Как бойки для обжатия, так и кулачки для опрессовки относятся к технологической оснастке формоизменяющих операций обработки металлов давлением. Различие заключается в характере работы инструмента: бойки деформируют заготовку путём частых последовательно чередующихся ударов (кузнецкая операция), а кулачки – путем давления (прессовая операция). В связи с этим, радиально-обжимные бойки могут быть использованы для формовки и редуцирования труб, опрессовки рукавов высокого давления, различного рода втулок и прочих подобных операций.

Основная часть

В работе рассмотрена возможность применения радиально-обжимных бойков для концевой заделки троса 1814-2354-00 (рисунок 1), разработанного организацией «п/я В-8413» (Дзержинский научно-исследовательский химико-технологический институт) опрессовкой в условиях современного мелкосерийного производства АО «Навлинский завод «Промсвязь».

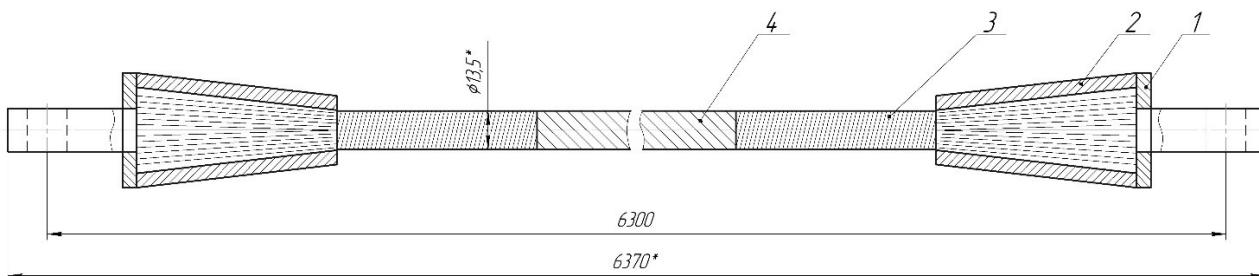


Рисунок 1 – Эскиз троса 1814-2354-00:
1 – серьга; 2 – втулка; 3 – проволока (бандаж), 4 – канат 13,5×12540 ГОСТ 3071-88

Данные троса используется в качестве тяговых органов кареток, приводной и натяжной станции и системы натяжных устройств транспортера подачи и выгрузки изделий 1577-1600-00, представляющего собой грузоведущий канатный конвейер замкнутого типа, который применяется при производстве взрывчатых веществ (рисунок 2).

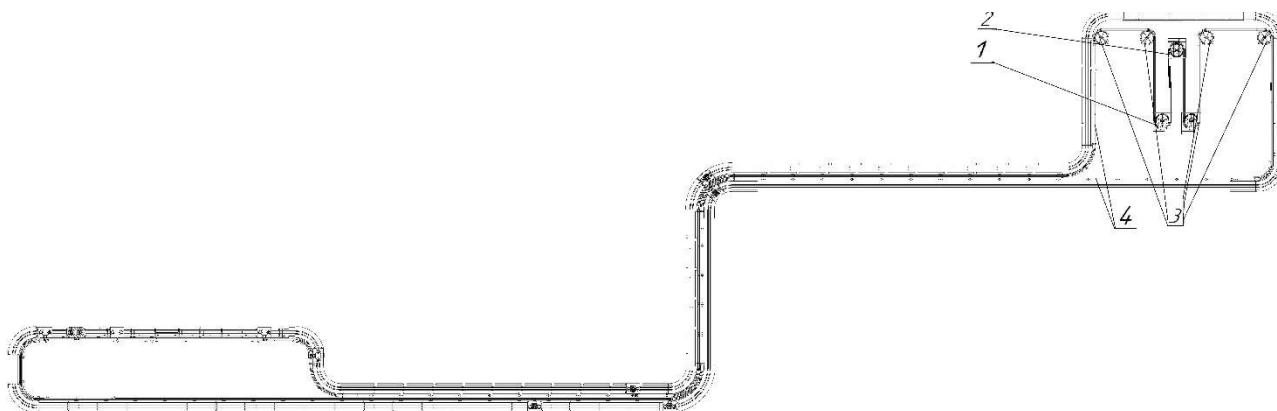


Рисунок 2 – Общая схема транспортера подачи и выгрузки изделий 1577-1600-00:
1 – приводная станция; 2 – натяжная станция; 3 – устройства натяжения (система блоков), 4 – тросы

Основные технические характеристики конвейера:

- длина пути конвейера (периметр) – 228,7 м;
- максимальное натяжение каната – 4,5 кН;
- окружная сила на приводных блоках – 8 кН;
- крутящий момент, передаваемый блоками – 3,77 кНм.

По техническим требованиям конструкторской документации сборка троса производится в следующей последовательности (рисунок 1):

1. Продеть канат (поз. 4) в конусную втулку (поз. 2).
2. Обмотать проволокой (поз. 3) на длине 70 мм от конца каната (создать бандаж).
3. Расплести канат в метелку, удалить органический сердечник и обезжирить каждую проволоку.
4. Метелку каната и внутреннее отверстие втулки (поз. 2) подготовить к пайке путем травления соляной или ортофосфатной кислотой.
5. Приварить серьгу (поз. 1) к втулке (поз. 2).
6. В отверстие серьги в вертикальном положении залить расплавленный легкоплавкий металл.

Наиболее важным аспектом сборки тросов является выбор способа концевой заделки, от которого зависит нагружочная способность и безопасность [3]. Наиболее широко применяется следующие методы концевой заделки тросов [3-5]:

1. Ручная заплетка с последующей обмоткой концов прядей проволокой (наложением бандажа). Это традиционный способ заделки каната, при котором конец каната фиксируется путем переплетения прядей каната после формирования петли. Преимущество заключается в том, что данная операция может выполняться ручным слесарным инструментом.
2. Использование канатных зажимов. Представляет оптимальный вариант замены заплетки, опрессовки втулкой или других способов соединения тросов, рассчитанные на сравнительно небольшие нагрузки с большим коэффициентом запаса.
3. Опрессовка каната втулками. Удобный и эргономичный способ заделки каната с высокой степенью эффективности. Обычно выполняется на гидравлических прессах со специальными матрицами. При этом в результате пластической деформации материал втулки заполняет зазоры у пустоты между прядями каната, сохраняя прочность на разрыв.
4. Заделка с помощью заливки металла с низкой температурой плавления во втулку. Данный способ является наиболее надежным с точки зрения эффективности заделки, но наиболее трудоемким.

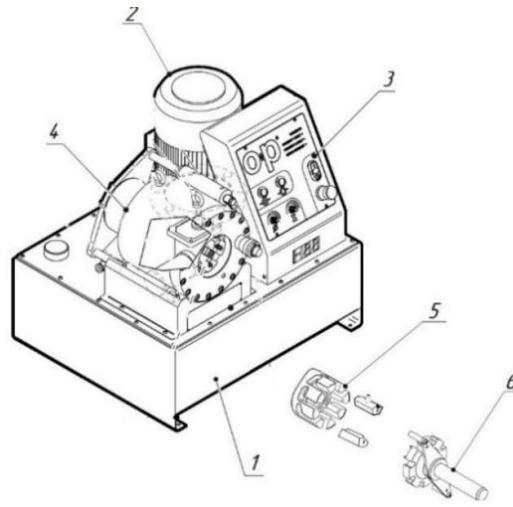
Таким образом, принимая в учет производственные возможности, эксплуатационную эффективность каждого способа концевой заделки, базовую технологию и усилие натяжения канатов по техническим характеристикам принимается решение: при сборке троса взамен наложения бандажа выполнить опрессовку каната втулкой с последующей заливкой легкоплавким металлом.

В качестве оборудования для обжатия втулки троса будет использован настольный радиально-опрессовочный станок Tubomatic H83/E EL, который представляет собой радиальный пресс, предназначенный для обжима рукавов высокого давления с 6 навивками до

1" и четырехнавивочного рукава диаметром до 1 1/2". Общий вид станка представлен на рисунке 3, а основные технические характеристики – в таблице 1.



a



1 – станина; 2 – электродвигатель с приводным блоком; 3 – панель управления; 4 – прессовый блок; 5 – обжимные кулачки; 6 – съемник кулачков

b

Рисунок 3 – Опрессовочный станок Tubomatic H83/E EL:
a – внешний вид; *б* – общая компоновочная схема

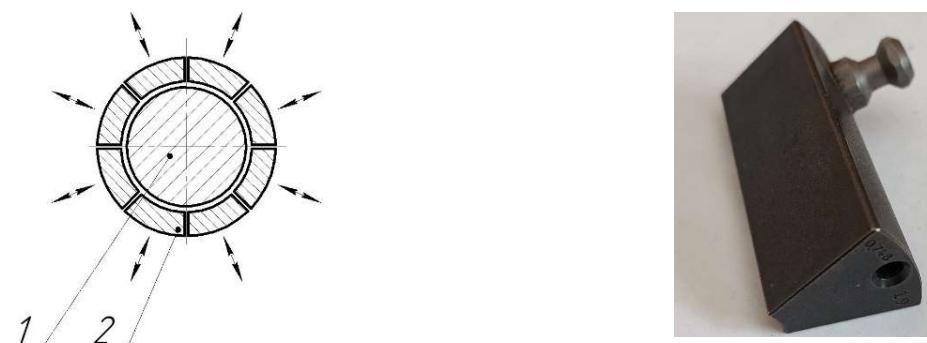
Таблица 1 – Основные технические характеристики станка Tubomatic H83/E EL

Параметр	Значение
Габаритные размеры, мм (длина × ширина × высота), мм	590×540×590
Усилие сжатия, т	135
Диапазон обжима, мм	10...64
Максимальное раскрытие кулачков, мм	диаметр кулачка +42
Максимальный диаметр открытия, мм	88,5
Теоретическая производительность	1136 циклов/час
Наибольший размер фитингов под опрессовку	1 1/2"
Мощность двигателя, кВт	3
Масса станка, кг	120

Опрессовочный станок деформирует заготовку посредством прессового блока, состоящего из восьми кулачков, расположенных равномерно концентрично вокруг оси пресса (рисунок 4). При работе гидравлического привода кулачки синхронно перемещаются к оси блока (рабочий ход) или от оси (холостой ход).

Для выполнения опрессовки втулки каната применены специальные кулачки, по конструкции сходные с радиально-обжимными бойками. Обжатие производиться конической поверхностью бойков, причем профиль обжимной поверхности бойков повторяет профиль наружной конической поверхности втулки (рисунок 5).

В конструкции бойков отверстия диаметром 5 мм используются для захвата приспособлением-съемником кулачков сразу всего комплекта в прессовый блок (рисунок 3б). Фиксаторы (рисунок 5б, поз. 3) служат для установки кулачков в прессовый блок. Упоры (рисунок 5, поз. 2) предусмотренные для исключения возможности перемещения заготовки в осевом направлении в процессе деформирования, крепятся к бойкам винтами с потайной головкой.

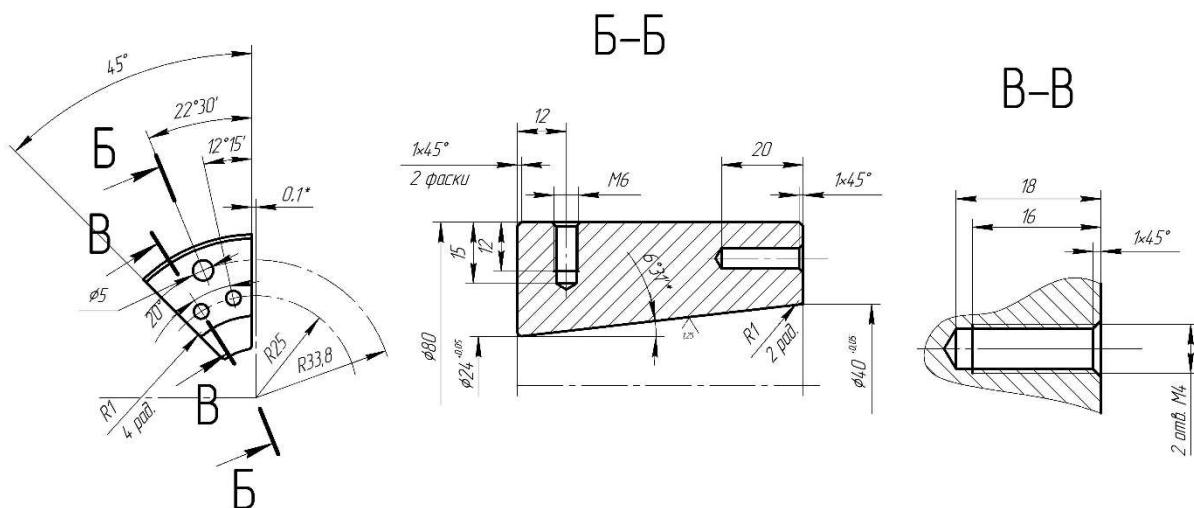


1 – обрабатываемая заготовка, 2 – кулачки

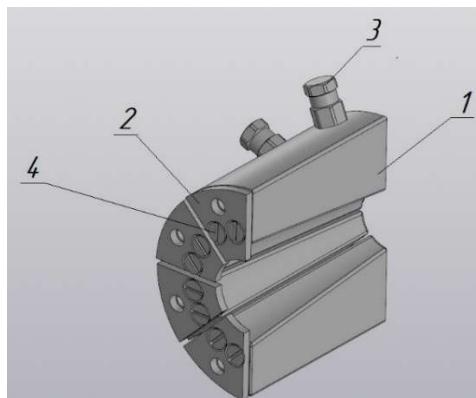
a

б

Рисунок 4 – Принцип работы радиально-обжимного пресса:
а – схема деформирования; б – внешний вид обжимного кулачка с фиксатором

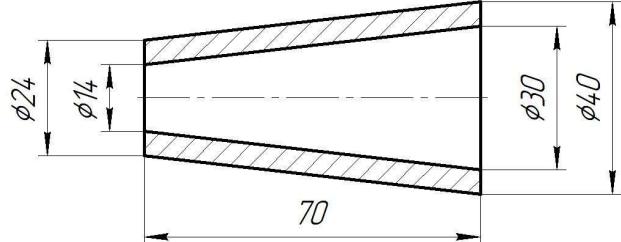


a



1 – кулачок; 2 – упор; 3 – фиксатор;
4 – винты

б



в

Рисунок 5 – Кулачки для опрессовки втулки троса:
а – эскиз кулачка; б – трехмерная модель применяемых кулачков (показано 4 шт.); в – эскиз втулки

В качестве материала втулки (рисунок 4б) согласно чертежу принимается труба горячедеформированная стальная труба Ø40×5 ГОСТ 8732-78 из стали 20 ГОСТ 1050-2013. Следовательно, учитывая механические свойства материала втулки, в качестве материала бойков используется инструментальная углеродистая сталь У8А с закалкой до твердости HRC 45...50. Исходной заготовкой бойков является круг диаметром 85 мм.

Маршрутная технология изготовления бойков:

1. На ленточнопильной операции отрезается заготовку из круга с припусками на оба торца.
2. Затем на токарно-винторезной операции осуществляется подрезка торцев, точение наружной поверхности с предварительным сверлением центрального отверстия под обработку конуса.
3. Далее на многоцелевой операции с ЧПУ растачивается конус и сверлятся крепежные отверстия.
4. После следует термообработка до твердости HRC 45...50.
5. И на электроэрозионной операции круг разрезается на восемь бойков. В качестве электрод-инструмента используется проволока, ширина реза 0,2 мм. Недостатком разрезки дисковой фрезой (рисунок 6) является большие погрешности формы боковых граней бойков в результате вибраций и сил резания.



Рисунок 6 – Разрезка цилиндра на вертикально-фрезерной операции

Как и в базовой технологии сборки, перед опрессовкой концы каната зачищаются, удаляется органический сердечник на расстоянии 70 мм от концов. Затем продевается канат в цилиндрическую втулку и выполняется опрессовка. Далее приваривается серьга ко втулке, и заливается легкоплавкий металл в полость втулки.

Заключение

В предлагаемой технологии использование опрессовки вместо наложения бандажа не только повышает производительность и сокращает объем слесарных работ, но и повышает коэффициент надежности троса, исключает необходимость пайки и травления кислотами. Внедрение данной технологии дает преимущества [6-8]:

1. Повышается местная прочность троса в результате образуемого наклена.
2. Улучшается заполнение полости втулки материалом каната.
3. Повышается производительность сборки тросов. Применение опрессовки взамен токарной операции сокращает штучное время сборочной операции и отходы металла в виде стружки.
4. Исключается необходимость пайки и травления кислотами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Любвин В.И. Обработка металлов радиальным обжатием / В.И. Любвин. – М.: Машиностроение, 1975. – 248 с., ил.
2. Радюченко, Ю.С. Ротационное обжатие / Ю.С. Радюченко. – М.: Машиностроение, 1972. – 176 с., ил.
3. ГОСТ EN 13411-3-2015. Концевая заделка стальных канатов. Безопасность. Часть 3. Зажимы стопорные и запрессовка = Terminations for steel wire ropes. Safety. Part 3. Ferrules and ferrulesecuring: межгосударственный стандарт: издание официальное: утвержден и введен в действие Евразийским советом по стандартизации, метрологии и сертификации 22 июня 2015 г. – Минск: Евразийский совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2015. – 26 с.
4. Руководство по применению стальных канатов и анкерных устройств в конструкциях зданий и сооружений / НИИ строит. конструкций Госстроя СССР. – М.: Стройиздат. – 1978. – 94 с.
5. Кошкин, А.П. Канаты для подъемных установок: учебное пособие / А.П. Кошкин, Г.Д. Трифанов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – 107 с.
6. О расширении области применения пластиически обжатых стальных прядей и изготовленных из них канатов / В.Ф. Даненко, Л.М. Гуревич, Е.Ю. Кушкина, Э.Б. Гладских // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2016. – Том 59. № 11. – С. 764 – 772.
7. Пат. 2366049 С1 Российская Федерация, МПК H01R 43/04. Способ опрессовки кабельных наконечников методом радиального прессования / И.В. Леонтьев, Л.Г. Гусев, В.В. Кузьмин (РФ). – № 2008127119/09; заявл. 03.07.2008; опубл. 27.08.2009, Бюл. № 24. – 14 с., ил.

8. А.с. 341990 СССР, МПК F 16g 11/02. Способ соединения наложенных один на другой концов тросов / В.Я. Телегин (СССР). – 1471630/25-27; заявлено 03.09.1970; опубл. 14.6.1972, Бюл. 19. – 3 с.

Низмеев Александр Александрович

АО «Навлинский завод «Промсвязь», р.п. Навля,
Брянская обл.
Инженер-конструктор
242130, Брянская обл., р.п. Навля,
ул. Комсомольская, д. 1
E-mail: scientist95@yandex.ru

Дорохов Даниил Олегович

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

NIZMEYEV A.A., DOROHOV D.O.

THE USING OF RADIAL SWAGING DIES FOR CABLE SEALING BY CRIMPING

Abstract. The article describes the possibility of using radial swaging dies for cable termination by crimping in small-scale production. Based on the crimping machine available at the factory, a set of special cams has been developed that allow performing the assembly operation by crimping, and the route technology for manufacturing cams and the proposed sequence of cable assembly are described. At the same time, unlike the basic technology, the use of crimping will increase productivity, improve the reliability and strength of the cable and eliminate the need to work with hazardous substances.

Keywords: radial swaging die, crimping cam, cable, conveyor, crimping machine, pressing unit, route technology, productivity.

BIBLIOGRAPHY

1. Lyubvin, V.I. Obrabotka metallov radialnym obzhatiyem / V.I. Lyubvin. – M.: Mashinostroyeniye, 1975. – 248 s., il.
2. Radyuchenko, Y.S. Rotatsionnoye obzhatiye / Y.S. Radyuchenko. – M.: Mashinostroyeniye, 1972. – 176 s., il.
3. GOST EN 13411-3-2015. Kontsevaya zadelka stalnykh kanatov. Bezopasnost. Chast 3. Zazhimy stopornyye i zapressovka = Terminations for steel wire ropes. Safety. Part 3. Ferrules and ferrulesecuring: mezhgosudarstvennyy standart: izdaniye ofitsialnoye: utverzhden i vveden v deystviye Evraziyskim sovetom po standartizatsii. metrologi i sertifikatsii 22 iyunya 2015 g. – Minsk: Evraziyskiy sovet po standartizatsii. metrologi i sertifikatsii. 2015. – 26 s.
4. Rukovodstvo po primeneniyu stalnykh kanatov i ankernykh ustroystv v konstruktciyah zdaniy i sooruzheniy / NII stroit. konstruktsiy Gosstroya SSSR. – M.: Stroyizdat. – 1978. – 94 s.
5. Koshkin, A.P. Kanaty dlya podyemnykh ustavok: uchebnoye posobiye / A.P. Koshkin. G.D. Trifanov. – 2-e izd.. pererab.i dop. – Perm: Izd-vo Perm. nats. issled. politekhn. un-ta. 2014. – 107 s.
6. O rasshireniu oblasti primeneniya plasticheski obzhatykh stalnykh pryadey i izgotovlennykh iz nikh kanatov / V.F. Danenko. L.M. Gurevich. E.Y. Kushkina. E.B. Gladskikh // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya. – 2016. – Tom 59. № 11. – S. 764 – 772.
7. Pat. 2366049 S1 Rossiyskaya Federatsiya. MPK H01R 43/04. Sposob opresovki kabelnykh nakonechnikov metodom radialnogo pressovaniya / I.V. Leontyev. L.G. Gusev. V.V. Kuzmin (RF). – № 2008127119/09; zayavl. 03.07.2008; opubl. 27.08.2009. Byul. № 24. – 14 s., il.
8. A.s. 341990 SSSR. MPK F 16g 11/02. Sposob soyedineniya nalozhennykh odin na drugoy kontsov trosov / V.Ya. Telegin (SSSR). – 1471630/25-27; zayavleno 03.09.1970; opubl. 14.6.1972. Byul. 19. – 3 s.

Nizmeyev Alexander Alexandrovich

JSC «Navlinsky Plant «Promsvyaz», Navlya settlement, Bryansk region
Design Engineer
242130, Bryansk region, Navlya settlement, Komsomolskaya str., 1
Ph.: +79514964041
E-mail: scientist95@yandex.ru

Dorokhov Daniil Olegovich

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

© Низмеев А.А., Дорохов Д.О., 2025

ГЕОРГИЕВСКАЯ Е.В., ГЕОРГИЕВСКИЙ Р.Н., ГЕОРГИЕВСКИЙ Н.В., ГРИШИН И.М.

К ВОПРОСУ ON-LINE МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ОПОРНЫХ УЗЛОВ ГИДРОАГРЕГАТА

Аннотация. Статья посвящена вопросу повышения эффективности вибромониторинга гидроагрегатов. В дополнение к нормативной оценке вибрационных параметров по суммарному широкополосному сигналу предложено выполнять векторный анализ по спектральным составляющим сигнала с учетом фазы. С помощью разработанной программы такой подход позволяет определять в on-line режиме фактические нагрузки, действующие на опорные узлы гидроагрегата. Это позволяет выявлять дефекты опорных узлов гидроагрегатов на ранних стадиях развития.

Ключевые слова: гидроагрегат, гидротурбина, режимы эксплуатации, опорные узлы, нагрузка, ресурс.

Введение

Надежность и безопасность эксплуатации гидроагрегата (ГА) в значительной степени зависит от состояния его опорных узлов – направляющих подшипников, под пятника (опорного подшипника), грузонесущих крестовин. Как для большинства вращающегося оборудования, контроль состояния опорных узлов осуществляется с помощью вибромониторинга [1].

В соответствии с отраслевыми нормативными требованиями [2,3] ограничения накладываются на величины абсолютных и относительных виброперемещений в заданных частотных диапазонах. Уровень виброперемещений зависит не только от конструкции и качества изготовления и монтажа гидроагрегата, но и от режима работы оборудования, сезонных колебаний температуры, фактических зазоров между вращающейся и неподвижной частями агрегата. Появление трещин приводит к изменениям жесткостных характеристик ГА и изменению качественной и количественной вибрационной картины [4].

Хотя вибромониторингу опорных узлов ГА уделяется большое внимание, значительная часть вынужденных остановов и внеплановых ремонтных работ связана с неудовлетворительным состоянием направляющих (турбинных, генераторных) подшипников. Это свидетельствует о том, что существующие методы контроля технического состояния направляющих подшипников недостаточно эффективны.

Объект исследования

В рамках данной статьи основное внимание удалено мощным (свыше 50 МВт) вертикальным трех-опорным гидроагрегатам поворотно-лопастного типа со спаренными валами.

Принципиальная конструктивная схема представлена на рисунке 1 (по данным отмененного в настоящее время ОСТ 108.023.105-84). Турбинный и генераторный валы соединяются с помощью фланцевого соединения. Гидроагрегат имеет три направляющих подшипника – два генераторных и один турбинный. Верхний генераторный подшипник расположен в верхней крестовине, нижний генераторный подшипник расположен в нижней грузонесущей крестовине, на которую опирается под пятник.

Нормативные требования

В соответствии с отраслевыми требованиями на мощных гидроагрегатах вибромониторинг должен осуществляться на непрерывной основе с помощью стационарных систем. Кроме того, до и после проведения капитального ремонта также проводится вибромониторинг с помощью переносных комплексов.

Измерение вибрации проводится в двух взаимно перпендикулярных направлениях – по берегам и по бьефам.

В соответствии с [2] оценка абсолютных вибраций опорных конструкций гидроагрегата проводится в трех частотных диапазонах: до 1 Гц, в полосе частот 1÷30 Гц, и выше 30 Гц. Оценка выставляется путем сравнения суммарного размаха виброперемещения и каждой его

гармонической составляющей с пороговыми значениями по графической шкале «отлично – хорошо – удовлетворительно – неудовлетворительно – недопустимо».

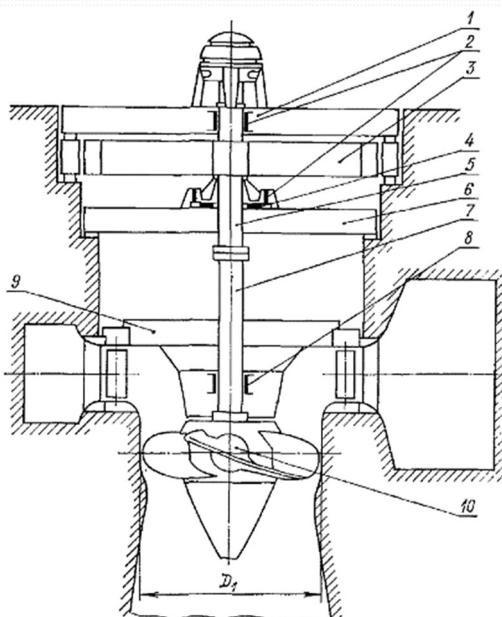


Рисунок 1 – Принципиальная конструктивная схема гидроагрегата

1 – крестовина верхняя; 2 – подшипники направляющие генератора; 3- ротор генератора; 4- подпятник; 5- вал генератора; 6 – крестовина нижняя, грузонесущая; 7 – вал турбины; 8 – подшипник направляющий турбины; 9 – крышка турбины; 10 – рабочее колесо

Оценка относительных виброперемещений, или как часто говорят гидроэнергетики – биений вала гидроагрегата, осуществляется в полосе частот $1\div20$ Гц путем сопоставления с предельными значениями, установленными заводом-изготовителем или по рекомендации экспертной организации с учетом опыта эксплуатации. В отличие от абсолютных виброперемещений, нормативная оценка относительных вибраций не рассматривает частотные составляющие сигнала.

В соответствии с Методикой оценки состояния оборудования по индексам технического состояния [5] и требованиями стандарта [2] вибромониторинг подразумевает не только сиюминутную оценку вибрационных параметров, но и отслеживание трендов их изменения.

Большинство систем вибромониторинга гидроагрегатов, эксплуатируемых в настоящее время на ГЭС, используют вышеописанную систему оценки для реализации функций предупредительной и аварийной сигнализации. При этом зачастую система вибромониторинга сигнализирует о наличии дефекта уже когда требуется немедленный останов гидроагрегата и/или долгий и дорогостоящий ремонт.

Очевидно, что построить достоверный прогноз изменения технического состояния опорных узлов и тем более эффективную предиктивную систему на основе исключительно описанных выше нормативных оценок не представляется возможным, требуется более глубокий анализ вибросигналов во всем частотном диапазоне с подробным изучением спектрального состава, вкладов отдельных гармонических составляющих сигналов, построения трендов с поправкой на режимы эксплуатации.

Теоретические и практические предпосылки

Важно отметить, что современные системы вибромониторинга регистрируют и сохраняют вибросигнал не только в виде интегрального значения виброперемещения в широкой полосе частот, но и по отдельным частотным составляющим в паре с фазой (по крайней мере, для первой гармоники). Для большинства крупных гидроагрегатов первая гармоника вибросигнала вносит наибольший вклад в общее вибрационное состояние.

Силовое воздействие на опорные узлы гидроагрегата можно определить на базе анализа относительных виброперемещений, если перейти от скалярных оценок общего уровня

вибраций, регламентируемых действующими нормативными документами, к векторным [6, 7].

Вектор определяется парой амплитуда-фаза для каждого режима работы ГА и представляется в виде точки на фазовой плоскости (рисунок 2). Фаза отсчитывается в градусах против часовой стрелки. Номера режимов обозначены цифрами. Характерные режимы эксплуатации ГА, на которых проводятся измерения вибрации, представлены в таблице 1. При изменении режима работы точка занимает на плоскости другое положение, соответствующее новому значению амплитуды и фазы. Отрезки, соединяющие две соседние режимные точки, с геометрической точки зрения показывают смещение вала вблизи соответствующего направляющего подшипника. Эти же отрезки, с физической точки зрения, показывают силовое воздействие на рассматриваемый опорный узел: длина отрезка пропорциональна силе, коэффициентом пропорциональности служит динамическая жесткость вкладыша подшипника.

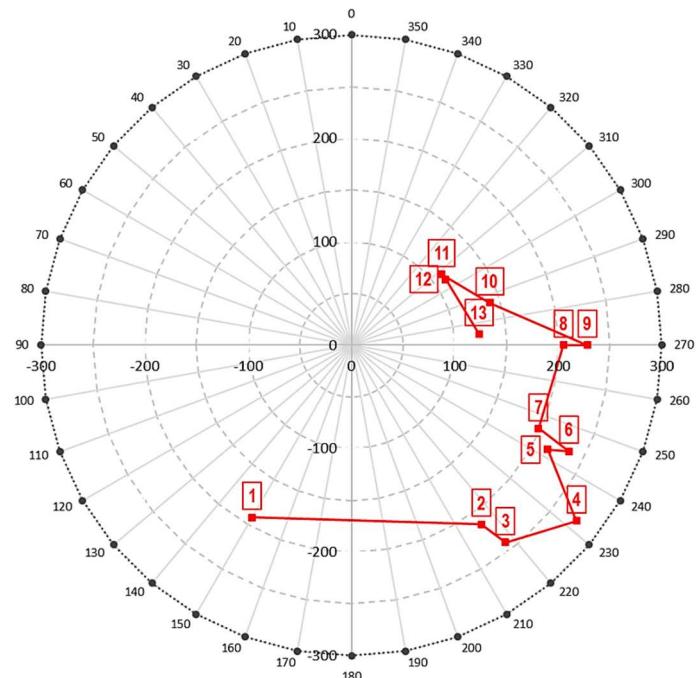


Рисунок 2 – Общий вид векторной диаграммы

Режим выбега используется как точка отсчета для всех остальных режимов, поскольку при выбеге на ГА практически не действуют внешние нагрузки. Для ГА в хорошем техническом состоянии точка выбега должна располагаться вблизи нуля. Вибрационные параметры на режиме выбега определяются индивидуальными особенностями ГА. Высокий уровень относительных виброперемещений может свидетельствовать о дефектах линии вала ГА.

Режим XX_{6B} характеризуется преимущественным воздействием центробежных нагрузок, обусловленных механическим дисбалансом ГА. Влияние гидродинамических сил на этих режимах незначительно. Соответственно, амплитуда вектора при наборе оборотов должна возрастать пропорционально квадрату скорости вращения, а фаза должна оставаться практически неизменной, т.е. точки 1-4 должны располагаться почти на одном радиусе.

В приведенном на рисунке 2 примере переход от режима 1 к режиму 2 характеризуется незначительным изменением амплитуды, что, большинство существующих систем мониторинга будет трактовать как отсутствие механического дисбаланса ГА. Однако, переход 1-2 сопровождается значительным изменением фазы ($>65^\circ$) и, соответственно, вызван воздействием значительных сил на рабочее колесо, ротор генератора и опорные узлы ГА. Неучет этих сил приводит к недостоверности прогноза изменения вибрационного состояния ГА.

Таблица 1 – Характерные режимы эксплуатации ГА

Номер	Обозначение режима	Описание режима
1	выбег	Выбег ГА из режима холостого хода без возбуждения
2	$XX_{бв} n=80\%$	Холостой ход без возбуждения с частотой вращения 80% от номинального значения
3	$XX_{бв} n=90\%$	Холостой ход без возбуждения с частотой вращения 90% от номинального значения
4	$XX_{бв} n=100\%$	Холостой ход без возбуждения с номинальной частотой вращения (100%)
5	$XX_{св}$	Холостой ход агрегата с возбуждением при номинальной частоте вращения вала
6	$P = 10-12\% P_n$	Режим параллельной работы с сетью на мощности 10-12% от номинального значения P_n
7	$P = 20-25\% P_n$	Режим параллельной работы с сетью на мощности 20-25% от номинального значения P_n
8	$P = 35-40\% P_n$	Режим параллельной работы с сетью на мощности 35-40% от номинального значения P_n
9	$P = 45-50\% P_n$	Режим параллельной работы с сетью на мощности 45-50% от номинального значения P_n
10	$P = 60-65\% P_n$	Режим параллельной работы с сетью на мощности 60-65% от номинального значения P_n
11	$P = 70-75\% P_n$	Режим параллельной работы с сетью на мощности 70-75% от номинального значения P_n
12	$P = 80-85\% P_n$	Режим параллельной работы с сетью на мощности 80-85% от номинального значения P_n
13	$P = 90-100\% P_n$	Режим параллельной работы с сетью на мощности 90-100% от номинального значения P_n

Кроме того, при наборе скорости фиксируется скачок фазы, что может свидетельствовать о наличии нестабильности, например, вызванной ослаблением натяга обода генератора на остов ротора или ослаблению крепежных элементов.

При переходе от режима $XX_{бв} n=100\%$ к режиму $XX_{св}$ помимо механических сил начинают действовать электромагнитные силы, обусловленные электромагнитным дисбалансом. Основными источниками дисбаланса являются искажение формы ротора, статора и воздушного зазора гидрогенератора, а также наличие эксцентрикитета установки ротора в расточке статора. Амплитуда вектора на фазовой плоскости при этом может как увеличиваться, так и уменьшаться в зависимости от направления результирующих механической и электромагнитной сил. Как правило, при переходе к режиму $XX_{св}$ наблюдается скачок фазы.

На режимах параллельной работы с сетью на мощности появляются дополнительные гидравлические нагрузки на узлы ГА. Величина такой нагрузки определяется не только фактической мощностью ГА, но и особенностями гидродинамических процессов в проточной части – гидравлическим небалансом, обусловленным неравномерностью подвода воды и лопастной решетки, несовершенством проточного тракта, наличием эксцентрикитета установки рабочего колеса и т.п.

Положение режимной точки на фазовой плоскости будет определяться векторной суммой сил механического, электромагнитного и гидродинамического происхождения и, очевидно, меняться в зависимости от набранной мощности.

На малых мощностях (режимы 6-7) часто наблюдается нестабильность положения режимной точки, когда небольшому изменению мощности соответствует значительный скачок амплитуды и/или фазы колебаний. Это связано с тем, что на малых мощностях гидродинамические процессы, протекающие в проточной части, имеют неустановившийся характер.

На средних и больших мощностях (режимы 8-13) для хорошо спроектированных поворотно-лопастных турбин, находящихся в хорошем техническом состоянии, характерно плавное изменение амплитуды и фазы при плавном наборе/сбросе мощности. Наличие каких-либо скачков на векторной диаграмме в этом диапазоне может свидетельствовать о необходимости настройки комбинаторной зависимости.

Определение сил, действующих на опорные узлы

Анализ траектории движения режимной точки по фазовой плоскости при смене режимов эксплуатации позволяет не только сделать выводы о превышении/непревышении допустимых уровней вибрации и о наличии/отсутствии механического, электромагнитного и гидравлического дисбалансов, но и оценить фактическую величину нагрузок на опорные узлы ГА на каждом эксплуатационном режиме.

Определение фактических нагрузок осуществляется на базе анализа истинных смещений вала (рисунок 2) при переходе от одного характерного эксплуатационного режима к другому.

Для практических целей удобно силовые воздействия раскладывать на составляющие с учетом природы их происхождения. Это позволяет более эффективно выявлять зарождающиеся дефекты и определять ключевые причины неблагополучного вибрационного состояния.

Для полноценной диагностики и прогнозирования изменения состояния опорных узлов целесообразно не только отслеживать временные тренды виброперемещений, но и автоматизировать процесс определения фактических усилий, действующих на опорные узлы ГА при различных режимах эксплуатации.

Разработанная программа создана на языке Python, который был выбран по нескольким ключевым причинам. Во-первых, Python обладает обширной экосистемой библиотек, упрощающих работу с данными, математическими расчётами и построением графических интерфейсов. Во-вторых, его кроссплатформенность позволяет использовать программу на различных операционных системах без дополнительной адаптации. Наконец, высокая читаемость кода на Python облегчает поддержку и дальнейшее развитие проекта.

Для работы программы используются три ключевые библиотеки. Оператор загружает данные из Excel-файлов, включая амплитуды, фазы биения подшипников и уставки агрегата. Библиотека автоматически проверяет корректность данных, например, исключает текстовые значения в числовых полях. SQLite3 сохраняет результаты расчётов в локальную базу данных, что обеспечивает быстрый доступ к истории измерений и возможность анализа трендов. DearGUI создает интуитивный графический интерфейс с таблицами, графиками и кнопками управления.

Программа разделена на три логических блока:

- модуль импорта данных;
- вычислительный модуль;
- модуль аналитики.

Модуль импорта данных обеспечивает загрузку и валидацию Excel-файлов. Алгоритмы проверки выявляют некорректные значения (например, нечисловые данные) и выводят сообщения об ошибках с указанием проблемных ячеек.

Вычислительный модуль на основе формул, включая тригонометрические преобразования и учёт жёсткостей подшипников, рассчитывает усилия для трёх режимов работы (выбег, холостой ход, нагрузка). Результаты автоматически сохраняются в базу данных.

Модуль аналитики генерирует таблицы с цветовой индикацией состояния агрегата, строит графики распределения усилий и временные ряды для выявления трендов.

Интерфейс программы также разделён на 3 функциональных блока, первым из которых является добавление данных. Это окно с полем для выбора Excel-файла и кнопкой запуска расчётов. На данном этапе предполагается выгрузка необходимых исходных данных из систем вибромониторинга через Excel-файл заданной структуры. Данные виджеты представлены на рисунке 3.

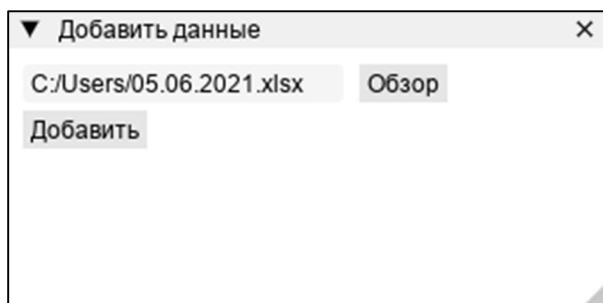


Рисунок 3 – Добавление данных

Вторым блоком является анализ данных за определённую дату. Он отображает таблицы с цветовой маркировкой (удовлетворительно-плохо-недопустимо) и графики, группирующие данные по направлениям или подшипникам с указанием допустимых и удовлетворительных уровней нагрузок. Результаты представляются для трех подшипников (ВГП – верхний генераторный, НГП – нижний генераторный, ТП – турбинный) в двух направлениях: по бьефам (ВБ-НБ) и по берегам (ЛБ-ПБ). Выделяется механическая Fm, электромагнитная Fe и гидравлическая Fh составляющие нагрузки для каждого эксплуатационного режима. Данные виджеты представлены на рисунке 4.

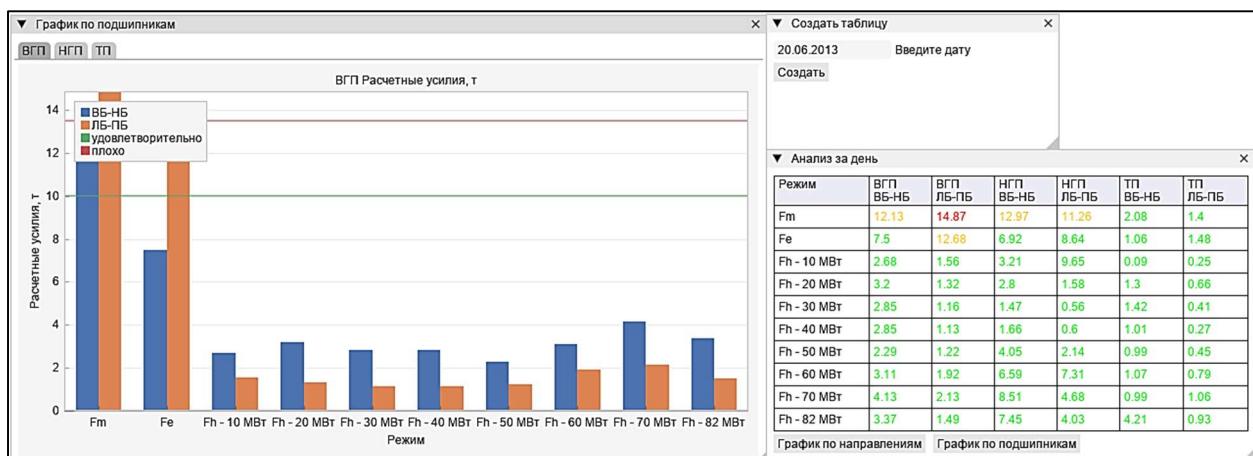


Рисунок 4 – Анализ за день

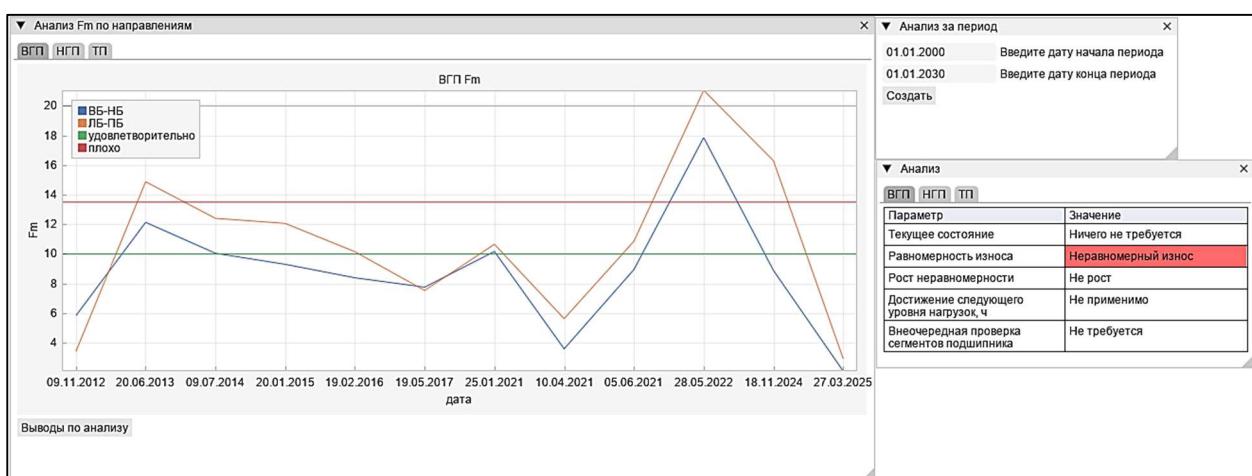


Рисунок 5 – Анализ за период

Финальным блоком является анализ данных за период. Он показывает графики временных рядов с отображением трендов и автоматические выводы о равномерности износа подшипника, росте нагрузок и рекомендации по обслуживанию. Данные виджеты представлены на рисунке 5.

Разработанная программа совместима с любой системой диагностики, позволяющей

идентифицировать амплитуды и фазы хотя бы первой гармоники вибрационного сигнала, не требует установки дополнительных датчиков, замены или доработки уже установленного дорогостоящего программного обеспечения.

Заключение

В статье кратко описана концепция системы определения фактических нагрузок на опорные узлы гидроагрегата на базе имеющейся информации систем вибромониторинга и представлена ее программная реализация на примере направляющих подшипников мощного трехпоршневого ГА.

Программа выполняет оценку текущего состояния подшипника с учетом фактической нагруженности опорных узлов в каждом эксплуатационном диапазоне, дает прогноз времени достижения критического уровня по нагрузкам, оценивает неравномерность износа и нарушение симметрии конструкции.

Программа может быть использована для повышения эффективности вибромониторинга в on-line режиме и выдачи рекомендаций для проведения внеочередного контроля, а также служить инструментом по переходу на ремонты по техническому состоянию гидроагрегатов.

Представленные в статье материалы получены в рамках выполнения научно-исследовательских работ при технической и финансовой поддержке Фонда Сколково.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Владиславлев Л.А. Вибрация гидроагрегатов гидроэлектрических станций. – М.: Энергия. – 1972. – 176 с.
2. ГОСТ Р 55260.3.2-2023. Гидроэлектростанции. Часть 3-2. Гидротурбины и механическая часть генераторов. Методики оценки технического состояния.
3. ГОСТ Р 70810-2023 Гидроэлектростанции. Гидроагрегаты. Эксплуатационный контроль вибрационного состояния опорных узлов.
4. Неменко А.В., Никитин М.М. Диагностика ранней стадии усталости вращающихся деталей машин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2021. Т. 57. № 2. С. 787-798.
5. Методика оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей, утв. Приказом Минэнерго от 26 июля 2017 года N 676, дата введения 17.10.2017, с изменениями от 17.03.2020 (Приказ Минэнерго N 192);
6. Георгиевская Е.В. От вибромониторинга – к вибродиагностике гидроагрегатов. Современные методы технической диагностики и неразрушающего контроля деталей и узлов. – 2022. – № 1.
7. Георгиевская Е. В. Преимущества векторного анализа при оценке вибрационного состояния гидроагрегатов //Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2022. – Т. 5. – № 355. – С. 199-207

Георгиевская Евгения Викторовна

ООО «Центр конструкторско-технологических инноваций»
Кандидат физико-математических наук
Директор по науке
Адрес: 194352, город Санкт-Петербург, пр-кт Просвещения, д. 46 к. 1 литер A
Тел. +7(921)971-64-43
E-mail: sciencedir@cdti.ru

Георгиевский Ростислав Николаевич

ООО «Центр конструкторско-технологических инноваций»
Руководитель проекта
Адрес: 194352, город Санкт-Петербург, пр-кт Просвещения, д. 46 к. 1 литер A
Тел. +7(921)316-61-01
E-mail: rngeorgievskii@cdti.ru

Георгиевский Николай Владимирович

ООО «Центр конструкторско-технологических инноваций»
Кандидат технических наук
Генеральный директор
Адрес: 194352, город Санкт-Петербург, пр-кт Просвещения, д. 46 к. 1 литер A
Тел. +7(921)971-64-43
E-mail: gendir@cdti.ru

Гришин Иван Михайлович

ООО «Центр конструкторско-технологических инноваций»
инженер
Адрес: 194352, город Санкт-Петербург, пр-кт Просвещения, д. 46 к. 1 литер A
Тел. +7(981)820-39-58
E-mail: imgrishin@cdti.ru

GEORGIEVSKAIA E.V., GEORGIEVSKY R.N., GEORGIEVSKY N.V., GRISHIN I.M.

ABOUT ONLINE HEALTH MONITORING OF HYDRAULIC UNIT SUPPORTS

Abstract. The article highlights some issues of increasing the efficiency of vibration monitoring of hydraulic units. In addition to the normative assessment of vibration parameters by the total broadband signal, it is proposed to perform vector analysis by the spectral components of the signal taking into account the phase. The program implementing this approach allows you to determine the actual loads acting on the support units of the hydraulic unit in on-line mode. This allows you to identify defects in the hydraulic unit supports at early stages of development.

Keywords: hydroelectric unit, hydraulic turbine, operating modes, support units, load, lifetime.

BIBLIOGRAPHY

1. Vladislavlev L.A. Vibraciya gidroagregatov gidroelektricheskikh stancij. – M.: Energiya. – 1972. – 176 s.
2. GOST R 55260.3.2-2023. Gidroelektrostancii. Chast 3-2. Gidroturbiny i mekhanicheskaya chast generatorov. Metodika ocenki tekhnicheskogo sostoyaniya.
3. GOST R 70810-2023 Gidroelektrostancii. Gidroagregaty. Ekspluatacionnyj kontrol vibracionnogo sostoyaniya opornyh uzlov.
4. Nemenko A.V., Nikitin M.M. Diagnostika rannej stadii ustalosti vrashchayushchihsya detalej mashin // Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii, 2021. T. 57. № 2. S. 787-798.
5. Metodika ocenki tekhnicheskogo sostoyaniya osnovnogo tekhnologicheskogo oborudovaniya i linij elektroperedachi elektricheskikh stancij i elektricheskikh setej, utv. Prikazom Minenergo ot 26 iyulya 2017 goda N 676, data vvedeniya 17.10.2017, s izmeneniyami ot 17.03.2020 (Prikaz Minenergo N 192);
6. Georgievskaya E.V. Ot vibromonitoringa – k vibrodiagnostike gidroagregatov. Sovremennye metody tekhnicheskoy diagnostiki i nerazrushayushchego kontrolya detalej i uzlov. – 2022. – № 1.
7. Georgievskaya E. V. Preimushchestva vektornogo analiza pri ocenke vibracionnogo sostoyaniya gidroagregatov //Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2022. – T. 5. – № 355. – S. 199-207

Georgievskaya Evgeniya Viktorovna

Center for design and technological innovation» LLC
Ph.D. (Physical&Mathematical Sciences)
Director for Science
194352, Saint-Petersburg,
prospekt Prosvetleniya, d. 46 str. 1
Tel. +7(921)971–64–43
E-mail: sciencedir@cdti.ru

Georgievsky Nickolay Vladimirovich

Center for design and technological innovation» LLC
Ph.D. (Technical Sciences)
General Director
Ph.D. (Technical Sciences)
194352, Saint-Petersburg,
prospekt Prosvetleniya, d. 46 str. 1
Tel. +7(921)971–64–43
E-mail: gendir@cdti.ru

Georgievsky Rostislav Nikolaevich

Center for design and technological innovation» LLC
Project Manager
194352, Saint-Petersburg,
prospekt Prosvetleniya, d. 46 str. 1
Tel. +7(921)316–61–01
E-mail: rngeorgievskii@cdti.ru

Grishin Ivan Mihailovich

Center for design and technological innovation» LLC
Ph.D. (Technical Sciences)
Engineer
194352, Saint-Petersburg,
prospekt Prosvetleniya, d. 46 str. 1
Tel. +7(981)820–39–58
E-mail: imgrishin@cdti.ru

© Георгиевская Е.В., Георгиевский Р.Н., Георгиевский Н.В., Гришин И.М., 2025

НЕМЕНКО А.В., НИКИТИН М.М., МЕШКОВ В.В.

ПРОГНОЗНЫЕ ОЦЕНКИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ СВЕРЛЕНИИ ОТВЕРСТИЙ В ИЗДЕЛИЯХ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. Предложен алгоритм управления процессом сверления отверстия в изделии из полимерных материалов на основе измерения температуры на внешней поверхности обрабатываемого изделия. В качестве критерия допустимости режима сверления рассматривается модуль температуры при бесконечном значении комплексного времени, который вычисляется по предлагаемому алгоритму. Для осуществления управляющего воздействия прогнозная оценка сравнивается с допустимыми значениями, получаемыми при нормировке, после чего схема может применяться на типовых изделиях, обладающих вариациями характеристик материала.

Ключевые слова: Сверление, пластмассы, полимеры, прогноз температуры, проактивное управление.

Введение

Полимерные изделия широко применяются в технике для создания корпусных конструкций, деталей облицовки, ненагруженных механических передач и в других целях.

При проектировании и ремонте изделий из полимерных материалов возникает необходимость в получении в них отверстий.

Несмотря на то, что в настоящее время получили распространение процессы 3D-печати, сверление отверстий резанием сохраняет актуальность при проведении ремонтных работ и получении поверхностей высокого класса точности [1],[2].

Кроме того, сверление отверстий резанием является основным способом их получения в изделиях из полимеров, армированных волокном [3],[4].

Применительно к процессам резания полимерные материалы характеризуются низкой теплопроводностью в сочетании с малой температурной стойкостью [5], что приводит к повышенной чувствительности процесса сверления к перегреву. При этом изделие может быть необратимо испорчено.

Вместе с тем, снижение скорости обработки вызывает общее снижение производительности технологического процесса, в котором используется сверление, и должно быть по возможности минимальным. Дополнительным нижним ограничением скорости резания является условие получения ровного края отверстия [6].

Таким образом, существует некоторая оптимальная скорость обработки, обеспечивающая наибольшую производительность при наименьшем риске получить неустранимый дефект в отверстии.

Нахождение этой скорости аналитически упирается в проблему сбора адекватных статистических данных [7], относящихся к материалу и конфигурации детали. Вместе с тем, как будет показано в настоящей работе, прогноз температуры в ходе единичного процесса сверления требует минимального характера допущений относительно физической природы теплообмена, и может быть практически реализован при наличии соответствующей системы датчиков.

Цель работы

Получение прогнозной оценки температуры в зоне обработки при сверлении отверстия в полимерном материале с целью предотвращения недопустимого перегрева обрабатываемого изделия.

Материал исследования

Считаем, что в процессе обработки максимальная температура в зоне резания описывается функцией времени

$$T = T(t), \quad (1)$$

аналитической в комплекснозначном смысле вдоль действительного луча $t \in [0, \infty)$.

Поставим задачу оценить значение этой функции при неограниченном возрастании переменной. С практической точки зрения, если полученное значение будет меньше

предельно допустимого по условиям технологического процесса, то термическое разрушение детали не сможет произойти и весь режим является допустимым.

Дискретизируем функцию (1), взяв её значения в равноотстоящие моменты времени, в результате получим последовательность

$$\{T\} = T_1, T_2, \dots, T_n, \dots \quad (2)$$

Будем искать асимптотическое значение функции (1) с помощью обработки последовательности (2).

Из аналитичности функции (1) вдоль действительной полуоси следует [8] существование её разложений в комплексной форме в ряды по положительным и отрицательным степеням комплексного времени z .

Запишем эти разложения

$$T(z) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n \cdot z^n \quad (3)$$

$$T(z) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{q_n}{z^n}. \quad (4)$$

Оба этих ряда являются правильными частями разложения одной и той же функции $T(z)$ в ряд Лорана в окрестности точки ($z = 0$) (для ряда (3) и бесконечно удаленной точки (для ряда (4)), главные части разложений в этих точках отсутствуют. При этом одновременная сходимость и ряда (3) и ряда (4) может не выполняться

Очевидно, что ряд (4) лучше сходится при больших значениях модуля z , а ряд (3) – при малых.

Возвращаясь к действительной переменной t , ряд (3) соответствует задаче ближнего, а ряд (4) – дальнего прогноза. Коэффициенты (3) могут быть получены с относительно умеренными вычислительными затратами, но дают мало информации о поведении функции при неограниченном возрастании времени, в то время как коэффициенты (4) в случае их задания позволяют эффективно решить задачу дальнего прогноза, но требуют для своего получения дополнительных подходов.

Применимально к поставленной задаче,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} T(t) = q_0. \quad (5)$$

Найдем этот коэффициент.

Рассмотрим функцию комплексного времени z

$$u(z) = T\left(\frac{z}{1-z}\right). \quad (6)$$

Обозначим

$$u(z) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n^* \cdot z^n, \quad (7)$$

где, как показано коэффициенты c_n^* определяются по формуле

$$c_n^* = \sum_{i=0}^{n-1} \binom{n-1}{i} \cdot c_{i+1} \quad (8)$$

Правая часть (6) может быть представлена как суперпозиция функций $X(w(z))$, где

$$w(z) = \frac{z}{1-z}. \quad (9)$$

Как показано в работе [9], функция (9) осуществляет отображение полубесконечной прямоугольной области $\{\operatorname{Re}(z) \in (-1/2, \infty), \operatorname{Im}(z) \in (-\infty, \infty)\}$ на единичный круг $|z|=1$. Используем её свойства для нахождения формул взаимного перехода между коэффициентами рядов (3) и (4).

Непосредственно из (6) следует обратное преобразование

$$T(z) = u\left(\frac{z}{1+z}\right). \quad (10)$$

Учитывая (10), представим ряд (4) в виде

$$u\left(\frac{z}{1+z}\right) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{q_n}{z^n}. \quad (11)$$

Решив соответствующее функциональное уравнение, приведем (11) к виду, при котором в правой части будет находиться ряд по положительным степеням z , коэффициенты которого могут быть получены [8] с помощью известных формул Тейлора или Коши:

$$u\left(\frac{1}{1+z}\right) = \sum_{n=0}^{\infty} q_n \cdot z^n, \quad (12)$$

откуда, в частности,

$$\begin{cases} q_0 = u(1) \\ q_1 = -u'(1) \\ q_2 = \frac{u''(1)}{2} + u'(1) \\ \dots \\ q_n = \frac{1}{n!} \cdot \left. \left\{ u^{(n)}\left(\frac{1}{z+1}\right) \right\} \right|_{z=0} \end{cases}, \quad (13)$$

здесь используется правило дифференцирования сложной функции, которое работает и в комплекснозначном её представлении.

Отметим, что достаточным условием наличия у функции $T(z)$ аналитичности в области, на которой были построены допущения, будет выполнение соотношения

$$R_u > 1, \quad (14)$$

где R_u – радиус сходимости ряда в правой части формулы (12).

В этом случае, согласно теореме Абеля, $u(z)$ будет аналитична во всех точках открытого круга $|z| < R$, который, очевидно, будет содержать своим подмножеством замкнутый круг $|z| < 1$, которому соответствует область $\{\operatorname{Re}(z) \in (-1/2, \infty), \operatorname{Im}(z) \in (-\infty, \infty)\}$ для функции $T(z)$, содержащая заявленную действительную полуось.

Формулы (13) в своём непосредственном виде ограниченно пригодны для вычислений если температурный ряд задан последовательностью (2), так как требуют многоступенчатого алгоритма с использованием суммирования рядов и операций численного дифференцирования.

Преобразуем их к следующему виду. Равноотстоящим точкам t для функции (1) и последовательности (2) соответствуют неравноотстоящие значения комплексного времени z для функции (5), определяемые соотношением

$$z = \frac{t}{1+t} \quad (15)$$

Разделим диапазон изменения переменной в функции (6) вдоль отрезка $(0,1)$ действительной оси на s частей, выбрав величину s , которой будет соответствовать наименьшая ошибка полиномиальной экстраполяции $u(z)$ на один шаг вперед.

Практика показывает, что для монотонных функций этому условию соответствуют значения $s = 4, \dots, 8$.

Выберем масштабирующий множитель α по оси времени и точки разбики $T(t)$ таким образом, чтобы в исходной последовательности (1) момент времени, соответствующий T_k , соответствовал бы

$$z = \frac{s-1}{s}. \quad (16)$$

Тогда величина масштабирующего множителя составит

$$\alpha = \frac{s-1}{t_k}. \quad (17)$$

Так, если последнее значение времени, в которое снимался отсчет температуры, составило $t_k = 1000$ миллисекунд, а интервал z надо разбить на $s = 7$ частей, то $\alpha = 0,006$.

Следующим шагом будет нахождение моментов времени для временного ряда (2), в которые должны быть известны значения температуры. Так как этим моментам будут соответствовать значения комплексного времени z , равные

$$z_n = \frac{n}{s}, \quad (18)$$

где $n = 0,1,2,\dots,s-1$, то, учитывая зависимость

$$\alpha \cdot t_n = \frac{z_n}{1-z_n}, \quad (19)$$

получим искомые моменты действительного времени как

$$t_n = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{n}{s-n}. \quad (20)$$

Так, в предыдущем примере, кроме значений при $t_0 = 0$ и $t_6 = 1000$ мс, которые совпадают со значениями при равноотстоящих моментах времени t , требуется определить температуру Т в моменты времени ($t_1 = 27,778$ мс, $t_2 = 66,667$ мс, $t_3 = 125$ мс, $t_4 = 222,222$ мс, $t_5 = 416,667$ мс).

Эти значения, с возможно большей точностью, следует определить интерполяцией между измеренными значениями.

Тогда искомые коэффициенты ряда (4) q_0, q_1 определяются экстраполяцией на один шаг вперед функции, проходящей через точки $\{T|_{t_n}, n/s\}$ и её соответствующих производных. Для этого могут применяться экстраполирующие полиномы. Используя методику сведения полиномиальной экстраполяции на один шаг к процессу скользящего среднего [10], получим расчетную формулу для коэффициента q_0 :

$$q_0 = (-1)^{s-1} \sum_{n=0}^{s-1} (-1)^s \cdot \binom{s}{n} \cdot T|_{t_n}. \quad (21)$$

Коэффициенты следующих порядков находятся раскрытием формул (13) как производных сложной функции, и экстраполяцией соответствующих производных полинома на один шаг. Этим способом могут быть найдены коэффициенты до s порядка включительно, в частности,

$$q_1 = \sum_{n=1}^{s-1} \lambda_n \cdot T|_{t_n}. \quad (22)$$

множители λ_n находятся приведением подобных слагаемых в производной интерполирующего полинома.

Сравнивая (21) с нормированными значениями, можно заранее предупредить недопустимый рост температуры и осуществить управляющее воздействие в виде снижения подачи или увеличения количества смазочно-охлаждающей жидкости.

Коэффициенты следующих порядков могут быть использованы для оценки времени наступления разрушительных последствий.

Таким образом, предлагаемый алгоритм позволяет осуществить принцип проактивного управления при сверлении изделий из полимерных материалов, предоставляя равновесное значение температуры контрольной точки с запасом времени до его наступления.

Величина резерва времени и степень соответствия температуры в контрольной точке температуре в зоне резания представляются вопросами дополнительного исследования.

Выводы

В настоящей работе предложен алгоритм управления процессом сверления отверстия в изделии из полимерных материалов на основе измерения температуры в контрольной точке на внешней поверхности обрабатываемого изделия.

Процесс изменения температуры рассматривается как аналитическая функция комплексного времени, на основании чего предложены формулы (13) для его асимптотики.

Основная идея вычислительного алгоритма состоит в использовании неравноотстоящих по времени значений температуры, которые оказываются равноотстоящими по функции времени, равной $t/(1-t)$. В результате бесконечно удаленная точка для времени соответствует следующему шагу дискретизации $t/(1-t)$, что позволяет вычислить коэффициенты асимптотического разложения (4) контрольного параметра с помощью полиномиальной экстраполяции функции (6) на один шаг вперед.

Для осуществления управляющего воздействия прогнозное значение функционал сравнивается с допустимыми значениями, получаемыми при нормировке, после чего схема может применяться на типовых изделиях, обладающих вариациями характеристик материала.

Была продемонстрирована работа метода на массиве фактических (зашумленных) значений температуры без использования дополнительных предположений (регрессии) о классе функции (1) и показано достижение точности порядка единиц процентов по расхождению между пределом функции (1) и пределом последовательности (2).

В качестве управляющего воздействия предполагается уменьшение подачи сверла или изменение количества подаваемой смазочно-охлаждающей жидкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Eliseev A., Kolubaev E. Friction drilling: a review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, vol. 116, no 5, p. 1391-1409.
2. Скрябин В.А. Особенности обработки деталей из полимерных материалов лезвийными инструментами/В.А. Скрябин// Транспортное машиностроение, 2022, № 5 (5) – С. 13-21.
3. Ciecielag K. Study on the machinability of glass, carbon and aramid fiber reinforced plastics in drilling and secondary drilling operations. Advances in Science and Technology. Research Journal, 2022, vol. 16, no 2, p. 57-66.
4. Dalle Mura M., Dini G. Drilling carbon fiber reinforced plastics with pre-cooling treatment by cryogenic fluid. Journal of Manufacturing Processes, 2021, vol. 68, p. 23-31.
5. Jagadeesh, P, Rangappa S.M., Suyambulingam, I, et al. Drilling characteristics and properties analysis of fiber reinforced polymer composites: a comprehensive review. Heliyon, 2023, vol. 9, no 3.
6. Seo, Jaewoo, Kim, Yeonoh, Kim, Dong Chan, et al. Numerical and experimental investigation of the delamination in drilling of the carbon fiber-reinforced plastic composite. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, vol. 112, no 7, p. 2373-2387.
7. Barik, T, Pal, K. Prediction of drilled hole quality in bidirectional woven carbon fiber reinforced plastic using wavelet packets of force-torque signals. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2021, vol. 40, no 21-22, p. 800-826.
8. Лаврентьев М.А. Методы теории функций комплексного переменного/М.А. Лаврентьев, Б.В. Шабат – М.: Наука, 1987. – 688 с.
9. Неменко А.В. Дальний прогноз показателей эксплуатационной надежности производственной системы /А.В. Неменко, М.М. Никитин//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2022, №4 (354). С.58-64.
10. 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

Мешков Владимир Викторович

ФГАОУ «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь

Кандидат технических наук, проректор по развитию и цифровой трансформации СевГУ

E-mail: medhkov@sevsu.ru

NEMENKO A.V., NIKITIN M.M., MESHKOV V.V.

PREDICTIVE ESTIMATES OF TEMPERATURE WHEN DRILLING HOLES IN POLYMERIC PRODUCTS

Abstract. An algorithm for controlling the process of drilling a hole in a product made of polymeric materials based on measuring the temperature on the outer surface of the workpiece is proposed. The temperature modulus at an infinite value of complex time, which is calculated using the proposed algorithm, is considered as a criterion for the admissibility of the drilling mode. To implement the control action, the predicted estimate is compared with the admissible values obtained during normalization, after which the scheme can be used on typical products with variations in material characteristics.

Keywords: Drilling, plastics, polymers, temperature forecast, proactive control.

BIBLIOGRAPHY

1. Eliseev A., Kolubaev E. Friction drilling: a review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, vol. 116, no 5, p. 1391-1409.
2. Skrjabin V.A. Osobennosti obrabotki detalej iz polimernyh materialov lezvijnymi instrumentami/V.A. Skrjabin// Transportnoe mashinostroenie, 2022, № 5 (5) – S. 13-21.
3. Ciecielag K. Study on the machinability of glass, carbon and aramid fiber reinforced plastics in drilling and secondary drilling operations. Advances in Science and Technology. Research Journal, 2022, vol. 16, no 2, p. 57-66.
4. Dalle Mura M., Dini G. Drilling carbon fiber reinforced plastics with pre-cooling treatment by cryogenic fluid. Journal of Manufacturing Processes, 2021, vol. 68, p. 23-31.
5. Jagadeesh, P, Rangappa S.M., Suyambulingam, I, et al. Drilling characteristics and properties analysis of fiber reinforced polymer composites: a comprehensive review. Heliyon, 2023, vol. 9, no 3.
6. Seo, Jaewoo, Kim, Yeonoh, Kim, Dong Chan, et al. Numerical and experimental investigation of the delamination in drilling of the carbon fiber-reinforced plastic composite. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, vol. 112, no 7, p. 2373-2387.
7. Barik, T, Pal, K. Prediction of drilled hole quality in bidirectional woven carbon fiber reinforced plastic using wavelet packets of force-torque signals. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2021, vol. 40, no 21-22, p. 800-826.
8. Lavrentev M.A. Metody teorii funkciy kompleksnogo peremennogo/M.A. Lavrentev, B.V. Shabat – M.: Nauka, 1987. – 688 s.
9. Nemenko A.V. Dalnij prognoz pokazatelej jekspluatacionnoj nadezhnosti proizvodstvennoj sistemy /A.V. Nemenko, M.M. Nikitin//Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tehnologii, 2022, №4 (354). S.58-64.
10. Nemenko A.V. Prognoznaja ocenka parametrov teplovogo polja sudovoj jenergeticheskoy ustanovki/ A.V. Nemenko, M.M. Nikitin// Vestnik SevNTU. Ser. Mehanika, jenergetika, jekologija: sb. nauch. tr. – Sevastopol, 2014. – vyp. 148 – s. 207 – 210.

Nemenko Alexandra Vasilyevna
FSAEI HE Sevastopol State University, Sevastopol
Ph.D. in Tech Science, docent of chair «Technical Mechanics and Machine Science»
Universitetskaya, 33, Sevastopol, Russian Federation, 299053
E-mail: valesan@list.ru

Mikhail Mikhailovich Nikitin
FSAEI HE Sevastopol State University, Sevastopol
Senior lecturer of chair «Higher Mathematics»
Universitetskaya st, 33, Sevastopol, Russian Federation, 299053
E-mail: mmnikitin @sevsu.ru

Meshkov Vladimir Viktorovich
FSAEI HE Sevastopol State University, Sevastopol
Ph.D. in Tech Science, Vice-Rector for Development and Digital Transformation of Sevastopol State University
Universitetskaya st, 33, Sevastopol, Russian Federation, 299053
E-mail: medhkov@sevsu.ru

© Неменко А.В., Никитин М.М., Мешков В.В., 2025

ГАЙНУЛЛИНА Я.Н., КАЛИНИН М.И., СОПИН П.К., МАЛЬКОВ С.Ю.

СИНТЕЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ ДЛЯ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА СПИНАЛЬНЫХ ИМПЛАНТИРУЕМЫХ ИЗДЕЛИЙ

Аннотация. Широкое внедрение в клиническую практику новых инструментальных технологий оперативных вмешательств при выполнении вертебрологических операций для лечения травм и заболеваний позвоночника требует расширения спектра медицинских разновидностей специальных имплантируемых изделий и конструкций. В статье рассматриваются новые технические решения, применения которых позволяет уйти от необходимости индивидуального(штучного) производства кейджей из титановых сплавов или полимеров типа полиэфир – эфир – кетон (PEEK). Возможность серийного изготовления имплантов даст возможность кардинально снизить стоимость этих изделий и обеспечить хирургов – вертебрологов спектром (размерным рядом) необходимых имплантатов для разных клинических ситуаций.

Ключевые слова: новая технология, станочные приспособления, имплтанты, кейджи, PLIF.

Введение

В современной практике выполнения высокотехнологичных малоинвазивных хирургических операций широкое применение нашли титановые, tantalевые и полимерные имплантаты, которые позволяют избавить пациентов от последствий травм или заболеваний поясничного отдела позвоночника. Однако, имеющиеся сегодня в распоряжении клиник имплтанты обладают рядом существенных недостатков. Конструктивно имплантанты многих фирм – производителей имеют площадь опорных поверхностей в диапазоне $250 \div 270 \text{ mm}^2$ исполнение вышеупомянутых (опорных) поверхностей позволяет им мигрировать относительно тел позвонков, допускать протрузию в замыкательные пластиинки, допускать не сращение выше – и нижележащих поверхностей тел позвонков, а кроме того, подобные изделия имеют высокую стоимость, что во многом объясняется вынужденным способом технологий индивидуального производства [1,2,3].

Основная часть

Целью работы является разработка и выбор оптимальных характеристик маршрутной технологии серийного производства вертебрологических имплантатов для операций на поясничном отделе позвоночника, как правило для уровней L4 – L5 или L5 – S1. Прогнозируемое за счёт этого снижение стоимости изделий медицинского назначения позволит существенно уменьшить затраты лечебных учреждений на их приобретение и сделает их более доступными для пациентов.

В качестве заготовок для имплантатов применялись титановые плиты марки ВТ – 1 – 00 толщиной 14 мм производства ВСМПО (г. Верхняя Салда). На начальном этапе выполнялся входной контроль качества титана в состоянии поставки на рентген – флюоресцентном спектрометре экспериментального класса фирмы «ELVAX». Спектрометр позволяет определить состав примесей и компонентов сплавов с точностью до 0,001%. Кроме того, по результатам анализа образца появляется возможность приборно – аппаратурной идентификации марки сплава в соответствии с ISO, ГОСТ, DIN и ASTM. Спектральный анализ с выдачей готовой информации занимает период времени в 100 секунд [4,5].

В случае наличия (обнаружения) токсичных примесей или компонентов, не являющихся биоинертными, образец бракуется и не поступает в производство. На следующей стадии выполняется заготовительная операция, а именно рубка на пресс – ножницах плиты на полосы с технологическими припусками. Далее пакетным способом через кондукторные втулки, выполненные из стали ХВГ, выполняется сверление ступенчатых, фасонных и резьбовых отверстий на боковых и торцевых (присоединительных) поверхностях имплантата. После этого на вертикально фрезерном станке выполняется П – образный паз для фиксации хирургического инструмента и сквозной продольный «шпоночный» паз для последующего заполнения имплантата гидроксиапатитной керамикой или аутокостью. Для выполнения дальнейших технологических операций предлагается роторно – ротационная токарная обработка рабочих поверхностей имплантатов на станке с ЧПУ средней серии. Обработка на этом этапе идёт в два приёма с перестановкой пакета имплантатов для проточки в продольном,

а затем и в поперечном направлении. Станочные приспособления, специально спроектированные и изготовленные для этих целей предоставлены на рисунках 1, 2 и 3.



Рисунок 1 – Устройство для реализации технологии серийного производства имплантов для PLIF вдоль продольной оси изделия



Рисунок 2 – Внешний вид станочного приспособления для производства вертебрологических имплантов



Рисунок 3 – Устройство для реализации серийного производства имплантов для PLIF вдоль поперечной оси изделия

Далее, после токарной обработки, выполняется шлифовка рабочих «фиксирующих» элементов имплантов на круглошлифовальном станке. Токарно – станочные приспособления имеют различные диаметры, что позволяет одновременно устанавливать в ротор (по необходимости) 12, 18, 24 или 36 заготовок изделий. Следующий этап маршрутной технологии включает в себя разборку ротора с установленными кейджами, удаление заусенцев, притупление острых углов и кромок. Затем, при необходимости, выполняется осмотр, доводка и пакетная обработка изделий в пескоструйной установке. Далее следует маркировка имплантов. В зависимости от клинических ситуаций (лордоз, сколиоз, кифоз) существует техническая возможность изготавливать имплантанты с различными углами конусности и различными габаритными размерами. Всего изготавливаются 24 размера имплантируемых конструкций для поясничного отдела позвоночника.

Следует заметить, что дегенеративные заболевания позвоночника, минно – взрывные травмы, бытовые повреждения, зачастую требуют применения нестандартных хирургических методик и доступов, а это, в свою очередь, приводит к необходимости иметь возможность быстро изготовить и применить имплант нестандартной конфигурации или размеров. Разработанная технология даёт эту возможность. На рисунке 4 показан внешний вид изготовленных на роторном станочном приспособлении спинальных имплантов из титанового сплава марки ВТ 1-00. Представленная серия состоит из 12 штук.

Особо следует остановиться на выборе количества форм, размеров и расположения фиксирующих элементов «зубьев» на опорных поверхностях имплантов [6,7,8].

Методом конечных элементов были выполнены необходимые расчёты НДС целью которых были параметры и величины прочности, жёсткости, устойчивости несущих элементов спинальных имплантов. Решена задача многокритериальной оптимизации факторов, влияющих на напряжённо – деформированное состояние исследуемых изделий.



Рисунок 4 – Внешний вид готовых имплантов (кейджей) для поясничного отдела позвоночника

При выполнении оперативных вмешательств стандартным хирургическим доступом необходимо обеспечить освобождение операционного поля на позвоночнике для введения и размещения кейджа в рабочем положении на замыкательной пластике. Для этого необходимо отодвинуть от зоны введения имплантата нервный корешок. Успех и качество операции зависят от времени воздействия на корешок и степени его деформирования без повреждения и обеспечения гарантированного последующего восстановления. Для этого было спроектировано и изготовлено специальное устройство для механического, а затем и электронного контроля натяжения нервного корешка [12] стр. 143 ÷ 144; 155. Серия операций с применением этого устройства позволила получить диаграмму, связывающую давление на корешки его перемещение (удаление) от зоны расположения кейджа на теле позвонка [11].

При изучении факторов, влияющих на эксплуатационные характеристики позвоночных имплантов, определились самые значимые из них, а именно: площадь контактной поверхности имплантата, геометрия опорных полей, расположение и размеры фиксирующих элементов, материал имплантата, наличие (или отсутствие) токсичных примесей. За базу сравнения разрабатываемой конструкции принимались импланты (аналоги) лучших мировых производителей, таких как: STRYKER, LEOPARD, DISK – O – TECH, DePuy, MATIYS, AESCULAP, MOST, V.LINK.BIOMED [9,10].

Опыт отработки маршрутной технологии изготовления кейджей показал целесообразность выполнения чистовой обработки заготовок инструментами из термостойких быстрорежущих сталей, например: B18M7K35 и B1825X4, а также твёрдых сплавов на вольфрамовой основе типа ВК8, ВК6М, Т15К6 или ВК60М. Для подбора режимов резания и выбора оборудования использовались следующие зависимости [13]:

$$V = \frac{C_V}{T^{0,35} S^{0,4} t^{0,2}}; \quad (1)$$

$$P_z = C_{pv}^{-0,1} S^{0,75} t^{0,9}, \quad (2)$$

где $C_V = 260$, $C_{pv} = 1800$ – коэффициенты, зависящие от вида обработки и марки обрабатываемого материала;

T – стойкость режущего инструмента (мин);

S – скорость подачи (мм/об);

t – глубина резания за проход (мм).

В нашем случае при реализации роторно – ротационной технологии серийного производства титановых имплантов применялись следующие параметры настройки станков:

Таблица 1 – Технологические параметры новой ротационной технологии.

Вид обработки	Скорость резания $V_{\text{н/с}}$	Глубина резания $t, \text{ мм}$	Подача $S_{\text{н/об}}$
Черновая	75÷40	5÷13	0,3÷1,0
Получистовая	110÷60	1÷6	0,2÷0,6
Чистовая	125÷90	0,5÷2,0	0,08÷0,19
Тонкая	210÷143	0,1÷1,1	0,02÷0,06

На основе компьютерных номограмм опорных поверхностей тел позвонков были определены и реализованы параметры технологических движений инструмента, что позволило сделать следующий шаг к конгруэнтной адаптации контактных поверхностей имплантов к форме позвонка. Достижение этого эффекта позволяет снизить напряжение, увеличить площадь опоры и минимизировать вероятность прорезии имплантата в тело позвонков.

Показанные на рисунках 1,2,3. Станочные приспособления для реализации инновационной роторной технологии позволяют обеспечить заданные радиусы кривизны контактной поверхности в двух перпендикулярных направлениях и с этой же (одной) установки сформировать пирамидальные зубья, являющиеся элементами фиксации имплантата. При этом, расположение, форма и размеры зубьев адаптированы к толщине и минеральной плотности костной ткани позвонков. Базирование титановых заготовок в станочном приспособлении осуществляется по предварительно отработанным отверстиям и по плоскостям. Ориентация базовых отверстий в оправке позволяет придавать заготовкам имплантатов заданную клиновидность.

Вышеописанные особенности разработанной технологии позволили получить малые (требуемые) серии имплантатов с заданными геометрическими характеристиками с обеспечением высокого качества и с непременным учётом анатомических особенностей элементов позвоночника на упомянутых уровнях L4 – L5 и L5 – S1.

Высокое качество и сбалансированная цена изделий, полученных благодаря разработанной технологии делают кейджи конкурентно способными в стране и за рубежом и доступными для широкого круга пациентов и специализированных клиник, где могут найти применение при лечении широкого спектра патологий, травм и заболеваний позвоночника. Оригинальность и новизна полученных технологических решений и устройств для их реализации подтверждаются серией полученных в РФ патентов на изобретения, например, некоторые из них: № 2626139, 2646580, 2680917 [15,16,17].

Заключение.

Технические инновационные решения, полученные в результате внедрения технологий в практику производства изделий медицинского назначения и в хирургическую практику параллельно, позволили получить имплантируемые кейджи для поясничного отдела позвоночника, обладающие комплексом оптимальных характеристик. Геометрические параметры и размеры фиксирующих элементов реально обеспечили надёжную фиксацию на замыкательных пластинках тел позвонков с нулевой миграцией. Это, в свою очередь, практически свело к минимуму необходимость выполнения ревизионных операций. В реальной медицинской практике было выполнено 437 операций на позвоночнике с положительным исходом и обеспечением опорности и функциональности. Установлено, что после полного погружения фиксирующих элементов в тела позвонков, напряжения в костных структурах замыкательных пластинок распределяются более равномерно, а их величина стремится к минимально возможной с учётом конструкции и геометрии используемого в расчётных моделях кейджа. Наиболее рациональной, принимается геометрия кейджа с бочкообразной формой опорной поверхности, приближающаяся к сфеноидной, повторяющей анатомическую форму тел позвонков. Картина распределения коэффициентов запаса прочности представлена в форме Губера – Мизеса – Генки. Минимальный коэффициент запаса прочности при сложном напряженно – деформированном состоянии в зоне максимальной нагрузки более трёх [14].

После серии пробных натурных испытаний механического устройства для измерения напряжения нервного корешка было принято решение разработать и изготовить более точное электронное устройство для этой же цели. Электронная система определения давления на корешок позволила оптимизировать длительность давления на корешок с учётом переменных квазиупругих свойств анатомических спинальных структур корешков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новиков Н.В. Эндопротезы суставов человека / Н.В. Новиков, Ю.А. Розенберг, И.А. Гавлик – К.: Материалы и технологии, 2011. – 527 с.
2. Продан А.И. Дегенеративные заболевания позвоночника / А.И. Продан, В.А. Радченко, Н.А. Корж – Харьков: АМНУ, Том 1, 2007. – 272 с.
3. Арнаудов Г.Д. Терминология методика – полиглotta – София: Государственное издательство медицинской литературы, 1999 г. – 943 с.
4. Петухов С.В. Биомеханика, бионика и симметрия – М.: Наука, 1981. – 239 с.
5. Дубровский В.Н. Биомеханика – М.: Владос – пресс, 2008. – 672 с.

6. Веретельник О.В. Моделирование реакции на силовое воздействие элемента поясничного отдела позвоночника // Вестник. – Севастополь: СевНТУ, 2008. – №2 – С. 18 – 25.
7. Педаченко Е.Г. Пункционная вертебропластика. – К.: Наука, 2005г. – 520 с.
8. Брехов А.Н. Эксперименты с пропорциями золотого сечения в системах инструментальной вертебропластики / А.Н. Брехов, С.Л. Елисеев, А.М. Поляков, М.И. Калинин– Цюрих: Бетания CH – 8044, 2007. – 311 с.
9. Брехов А.Н. Межтелевые имплантанты с композитным титанокемическим покрытием в хирургической стабилизации позвоночника // Актуальные вопросы травматологии и ортопедии. – Донецк, 2009 г. – 167 с.
10. Брехов А.Н. Биомеханический анализ при повреждениях и заболеваниях позвоночника // Вестник – Севастополь: СевНТУ. – 2008. – №10 – С. 268 – 283.
11. Брехов А.Н. Мультимодульный межтелевой имплантат для заднего межтелового спондилодеза. //Сборник научных трудов XV съезда ортопедов – травматологов. – Днепропетровск: Лира. – 2010. – С. 254 – 258.
12. Гайнуллина Я.Н. Оценка деформативности элементов 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.
13. Гайнуллина Я.Н. Разработка анатомически адаптированных имплантантов для малоинвазивного заднего межтелового спондилодеза / Я.Н. Гайнуллина, М.И. Калинин, П.К. Сопин // Вестник. – Севастополь: СевНТУ. – 2008. – № 3 – С. 123 – 128.
14. Калинин М.И. Разработка новых инструментальных технологий имплантации анатомически адаптированных металлоконструкций для малоинвазивного заднего межтелового спондилодеза / М.И. Калинин, Я.Н. Гайнуллина, П.К. Сопин // Вестник. – Севастополь: СевНТУ. – 2010. – № 3 – С. 123 – 128.
15. Пат. 2626139 Российская Федерация, МПК A61F 2/44. Спинальный имплант закрытого исполнения / Пашков Е.В., Калинин М. И., Поляков А.М., Пахалюк В.И.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Севастопольский государственный университет". – № RU 22015128374; заявл. 13.07.2015; опубл. 21.07.2017. Бюл. № 21.
16. Пат. 2646580 Российская Федерация, МПК A61F 2/44. Эндопротез позвонка с прилегающими к нему межпозвонковыми дисками / Пашков Е.В., Калинин М. И.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Севастопольский государственный университет". – № RU 2015138640; заявл. 26.05.2016; опубл. 05.03.2018.. Бюл. № 7.
17. Пат. 2680917 Российская Федерация, МПК A61F 2/44. Мембранный – торсионный эндопротез межпозвонкового диска / Пашков Е.В., Калинин М. И. Лозинский Н.А.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Севастопольский государственный университет". – № RU 2016120700; заявл. 26.05.2016; опубл. 28.02.2019.. Бюл. № 7.

Гайнуллина Яна Николаевна

АНО «Международный центр комплексной реабилитации»,
Старший научный сотрудник лаборатории
биомедицинских технологий г. Севастополь,
пр-т. Нахимова, 2
e-mail: medeya-ru@yandex.ru

Сопин Павел Константинович

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный
университет»,
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Приборостроение и транспорт»
г. Севастополь, ул. Университетская, 33
тел. +7(8692) 545-023
e-mail: pavel.sopin@gmail.com

Калинин Михаил Иванович

АНО «Международный центр комплексной реабилитации»,
Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник
лаборатории биомедицинских технологий г. Севастополь,
пр-т. Нахимова, 2
e-mail: kalinin2710@yandex.ru

Мальков Сергей Юрьевич

АНО «Международный центр комплексной реабилитации»,
Старший научный сотрудник лаборатории
биомедицинских технологий г. Севастополь,
пр-т. Нахимова, 2
e-mail: 941800@bk.ru

GAINULLINA Ya.N., KALININ M.I., SOPIN P.K., MALKOV S.Y.

SYNTHESIS OF TECHNOLOGICAL DEVICES FOR MASS PRODUCTION OF SPINAL IMPLANTABLE PRODUCTS

Annotation. The widespread introduction into clinical practice of new instrumental technologies of surgical interventions in performing vertebrological operations for the treatment of spinal injuries and diseases requires an expansion of the range of medical varieties of special implantable products and structures. The article discusses new technical solutions, the application of which makes it possible to avoid the need for individual (piece-by-piece) production of cages made of titanium alloys or polymers such as polyester – ether – ketone (PEEK). The possibility of serial manufacturing of implants will make it possible to drastically reduce the cost of these products and provide vertebrologists with a range (range of sizes) of necessary implants for different clinical situations.

Keywords: new technology, machine tools, implants, cages, PLIF.

BIBLIOGRAPHY

1. Novikov V.N. Endoproteza systavov cheloveka / V.N. Novikov, Yu.A. Rozenberg, I.A. Gavlik– K.: Materiali i tekhnologii, 2011. – 527 s.
2. Prodan A.I. Degenerativnie zabolevaniya pozvonochnika / A.I. Prodan, V.A. Radchenko, N.A. Korzh– Kharkov: AMNY, Tom 1, 2007. – 272 s.
3. Arnaydov G.D. Terminologiya metodika – poliglota – Sofiya: Gosydarstvennoe izdatelstvo meditsinskoy literaturi, 1999 g. – 943 s.
4. Petukhov S.V. Biomekhanika, bionika i simetriya – M.: Nauka, 1981. – 239 s.
5. Dubrovskiy V.N. Biomekhanika – M.: Vlados – press, 2008. – 672 s.
6. Veretelnik O.V. Modelirovanie reaktsii na silovoe vozdeystvie elementa poyasnichnogo otdela pozvonochnika // Vestnik. – Sevastopol: SevNTY, 2008. – №2 – S. 18 – 25.
7. Pedachenko E.G. Punktsionnaya vertebroplastika. – K.: Nauka, 2005г. – 520 s.
8. Brekhov A.N. Eksperimenti s proporsiyami zolotogo secheniya v sistemakh instrumentalnoy vertebroplastiki / Brekhov A.N., Eliseev S.L., Polyakov A.M., Kalinin M.I. – Tsyurikh: Betaniya SN – 8044, 2007. – 311s.
9. Brekhov A.N. Mezhtelovie implanti s kompozitivnim titanokeramicheskim pokritiem v khirurgicheskoy stabilizatsii pozvonochnika // Aktualnie voprosi travmatologii I ortopedii. – Donets, 2009 g. – 167 s.
10. Brekhov A.N. Biomekhanicheskiy analiz pri povrezhdeniyakh i zabolevaniyakh pozvonochnikakh // Vestnik. – Sevastopol: SevNTY. 2008. – №10 – S. 268 – 283.
11. Brekhov A.N. Multimodulniy vtzhtelovoy implant dlya zadnego spondilodeza // Sbornik naychnikh trudov XV sezda ortopedov – travmatologov . – Dnepropetrovsk: Lira. – 2010. – S. 254 – 258.
12. Gaynullina Ya. N. Otsenka Deformativnosti elementov system pri slozhnosti nagruzheniya / Ya.N. Gaynullina, M.I. Kalinin // Fundamentalnie i prikladnie problem tekhniki i tekhnologii . – Orel: OGU im. I.S. Turgeneva. – 2023. – № 4(360) – S. 16 – 24.
13. Gaynullina Ya. N. Razrabotka anatomicheski adaptirovannikh implantov dlya naloivazivnogo zadnego mezhtelovogo spondilodeza / Ya. N. Gaynullina, M.I. Kalinin, P.K. Sopin // Vestnik. – Sevastopol: SevNTY. – 2008. – № 3 – S. 123 – 128.
14. Kalinin M.I. Razrabotka novikh instrumentalnikh tekhnologiy implantatsii anatomicheski flaptirovannikh metallokonsruktsiy dlya maloinvazivnogo zadnego vezhtelovogo spondilodeza / M.I. Kalinin, Ya. N. Gaynullina, P.K. Sopin // Vestnik. – Sevastopol: SevNTY. – 2010. – № 3 – S. 123 – 128.
15. Pat. 2626139 Rossiyskaya Faderatsiya, MPK, A61F 2/44. Spinalniy implant zakpitogo ispolneniya / Pashkov E.V., Kalinin M.I., Polyakov A.M., Pakhaluk V.I.; zayavitel i patentooobladatel Federalnoe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatelnoe uchrezhdenie visshego obrazovaniya "Sevastopolskiy gosudarstvennyi yniversitet". – № RU 22015128374; zayavl. 13.07.2015; opubl. 21.07.2017. Byul. № 21.
16. Pat. 2646580 Rossiyskaya Faderatsiya, MPK A61F 2/44. Endoprotez pozvonka s prilegayushchimi k nemu mezhpozvonkovimi diskami / Pashkov E.V., Kalinin M.I.; zayavitel i patentooobladatel Federalnoe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatelnoe uchrezhdenie visshego obrazovaniya "Sevastopolskiy gosudarstvennyi yniversitet". – № RU 2015138640; zayavl. 26.05.2016; opubl. 05.03.2018.. Byul. № 7.
17. Pat. 2680917 Rossiyskaya Faderatsiya, MPK A61F 2/44. Membranno – torsionniy endoprotez mezhpozvonkovogo diska / Pashkov E.V., Kalinin M.I., Lozinskiy N.A.; zayavitel i patentooobladatel Federalnoe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatelnoe uchrezhdenie visshego obrazovaniya "Sevastopolskiy gosudarstvennyi yniversitet". – № RU 2016120700; zayavl. 26.05.2016; opubl. 28.02.2019.. Byul. № 7.

Gainullina Yana Nikolaevna

ANO "International Center for Comprehensive Rehabilitation",
Senior Researcher at the Laboratory of Biomedical Technologies, Sevastopol,
pr. Nakhimova, 2
e-mail: medeya-ru@yandex.ru

Sopin Pavel Konstantinovich

Sevastopol State University,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department
"Instrument engineering and transport"
Sevastopol, Universitetskaya str., 33
tel. +7(8692) 545-023
e-mail: pavel.sopin@gmail.com

Kalinin Mikhail Ivanovich

ANO "International Center for Comprehensive Rehabilitation",
Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher
Laboratory of Biomedical Technologies, Sevastopol,
pr. Nakhimova, 2
e-mail: kalinin2710@yandex.ru

Malkov Sergey Yurievich

ANO "International Center for Comprehensive Rehabilitation",
Senior Researcher at the Laboratory of Biomedical Technologies, Sevastopol,
pr. Nakhimova, 2
e-mail: 941800@bk.ru

КАНАТНИКОВ Н.В., РАДЧЕНКО С.Ю.

МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС СТАНДАРТНОГО И СПЕЦИАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ

Аннотация. В работе представлен метод оптимизации процесса лезвийной обработки зубчатых венцов стандартного и специального профиля. Предложено использовать гибридную модель процесса обработки сочетающую подходы аналитического, численного и эмпирического моделирования, что позволяет получить комплекс зависимостей, описывающих физические явления, сопровождающие процесс резания и прогнозирующих практические результаты обработки и на следующем шаге в рамках оптимизации заданных выходных параметров решить обратную задачу моделирования – определить оптимальные регулируемые конструкторско-технологические параметры процесса.

Ключевые слова: зубообработка, резание, моделирование резания, оптимизация резания.

Введение

Теория оптимизации технологических процессов получила широкое теоретическое и практическое развитие в работах отечественных и зарубежных ученых. Широко раскрыты темы выбора: заготовки и метода ее изготовления, маршрута обработки, припусков, технологических операций, количества и последовательности переходов и операций, станочных приспособлений и режимов обработки. В научной и справочной литературе приводятся решения, позволяющие оптимизировать широко распространенные процессы: точение, фрезерование, сверление. Однако информации, посвященной решению оптимизационных задач механической обработки зубчатых колес стандартного и специального профиля, значительно меньше и зачастую она носит узконаправленный характер. Можно выделить работы, посвященные оптимизации режимов резания при зубодолблении и зубофрезеровании А.С. Тарапанова, Г.А. Харламова, О.В. Погохина, [1, 2], а также работы, посвященные выбору оптимальных конструкционных параметров зубообрабатывающего инструмента [3, 4]. Универсальные рекомендации для поиска оптимальных регулируемых конструкторско-технологических параметров системы при обработке стандартных и специальных зубчатых колес в научной и специальной литературе отсутствуют. Это можно связать с тем, что классические оптимизационные модели режимов обработки строятся на экспериментальных зависимостях, и, если для точения и фрезерования существуют универсальные зависимости, то для процессов зубообработки, зачастую, такие зависимости необходимо получать отдельно.

Основная часть

В данной работе предложен универсальный метод оптимизации процесса обработки зубчатых колес стандартного и специального профиля. Общая схема, иллюстрирующая оптимизацию процесса резания, приведена на рисунке 1. Процесс оптимизации состоит из двух этапов:

- 1) моделирование отношения входных и выходных параметров процесса резания;
- 2) определение оптимального или квазиоптимального решения (решений).

Задачей любого моделирования процесса механической обработки является выявление взаимосвязей между входными конструкторско-технологическими параметрами процесса (режимами обработки, параметрами оборудования, геометрией и конструкцией режущего инструмента и др.) и зависимыми от них выходными параметрами, важными для производства (точность, качество, основное время, стойкость инструмента, форма стружки и др.). Для моделирования требуется выполнить следующие шаги (см. рисунок 1):

1.1 Определить проблему оптимизации процесса обработки, выявив ее критичность с точки зрения конкретно решаемой задачи. На данном этапе определяются выходные параметры, имеющие наибольшую важность для рассматриваемой задачи, а также определяются те входные параметры, которыми возможно управлять. При оптимизации

резания следует стремиться установить и оказывать влияние на наиболее управляемые параметры процесса и сократить влияние неконтролируемых параметров.

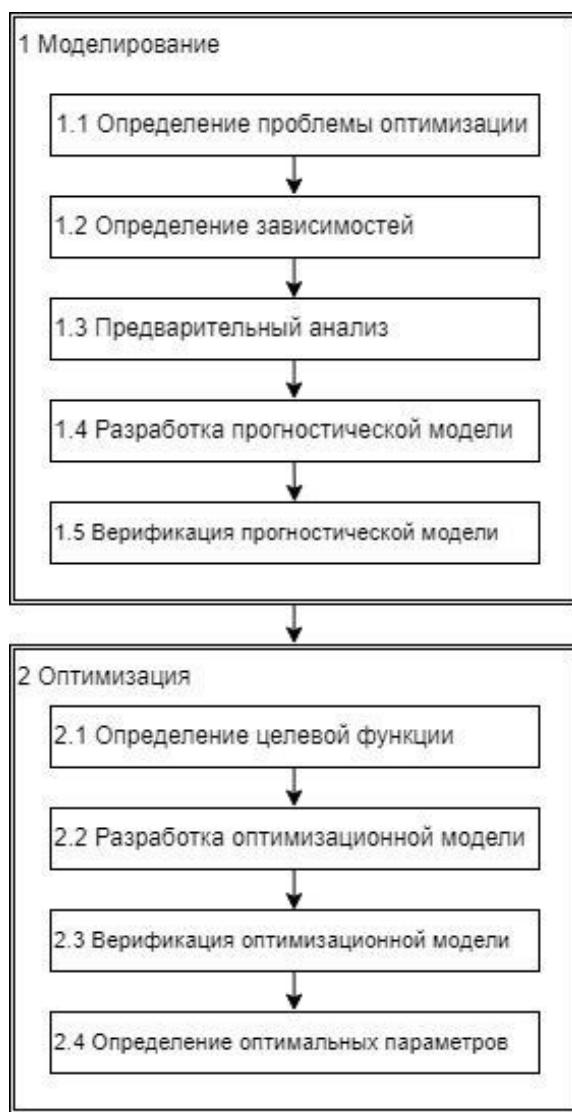


Рисунок 1 – Общая схема оптимизации процесса резания

В качестве входных параметров можно выделить: геометрические параметры и материал обрабатываемого зубчатого венца, режимы резания, конструкцию и материал инструмента, оборудование и др. Обработка зубчатых колес стандартного и специального профиля представлена следующими выходными параметрами: точность зубчатого венца, качество поверхности, производительность процесса зубообработки, стойкость инструмента и др.

1.2 Определение зависимостей, связывающих входные и выходные параметры процесса резания. На этом этапе необходимо определить возможные значения выходных параметров в зависимости от изменения входных параметров в их рабочих диапазонах. Полученные результаты должны быть связаны с проблемой оптимизации процесса, определенной на предыдущем этапе.

1.3 Предварительный анализ данных. В случае использования эмпирических методов установления зависимостей между входными и выходными параметрами процесса возможно возникновение большого объема данных. Тогда на третьем этапе необходимо применить методы статистики.

1.4 Разработка прогностической модели. На данном этапе важно разработать простую в использовании и экономичную в реализации модель.

Для прогностического моделирования могут быть использованы эмпирические, аналитические, численные и гибридные (сочетающие в себе выше перечисленные подходы) модели [5]. Ранее был предложен подход гибридного моделирования для исследования процессов зубообработки [6, 7]. Используя данное решение были спрогнозированы силы резания [8, 9], а также тепловые явления сопровождающие процесс резания [10, 11].

Предложенная методология гибридного моделирования основана на трехэтапном подходе. На первом этапе за счет средств математического моделирования исследуется кинематика процесса резания, определяется геометрия срезаемой стружки и изменения углов резания. На втором этапе происходит создание моделей инструмента и заготовки с заданием полученных ранее о стружке. На третьем этапе происходит моделирование в среде конечно-элементного анализа и расчет физических параметров сопровождающих резание.

1.5 Верификация прогностической модели. Предложенную модель процесса резания необходимо проверить на адекватность в нескольких различных ситуациях, в том числе в ситуациях, когда выходные параметры принимают критические значения.

2.1 Определение целевой функции оптимизации. При поиске оптимальных параметров резания возможно использование множества критериев выбора, каждый из которых отражает различные аспекты процесса резания. Использование той или иной целевой функции оптимизации зависит от конкретного рассматриваемого процесса.

В качестве наиболее распространенных целевых функций процесса оптимизации режимов резания можно выделить:

I. Критерий максимальной производительности. Производительность обратна штучно-калькуляционному времени на операцию. Штучно-калькуляционное время можно разделить на время, зависящее от режимов резания, и не зависящее. Так как управлять составляющими штучно-калькуляционного времени не зависящего от режимов резания представляется затруднительным (данная задача относится к области организации производства), целевую функцию можно записать зависимостью 1.

$$\Pi = \frac{1}{t_{PE3}}, \Pi \rightarrow \max, \quad (1)$$

где t_{PE3} – время затраченное на операцию резания, мин.

Недостатком использования данного критерия является то, что показатель производительности не учитывает другие ограничения, связанные с дополнительными расходами. В частности, использование дорогостоящего и конструктивно сложного режущего инструмента, выход из строя которого раньше времени может привести к затратам во много раз превышающим экономический эффект от оптимизации режимов обработки.

II. Критерий минимальной себестоимости. Себестоимость можно определить как сумму затрат на время резания, на холостую работу оборудования, время установки и снятия заготовки, на время смены инструменты и на стоимость инструмента, зависимости 2-4.

$$C_O = C_{PE3} + C_{BC} + C_{CI} + C_H, C_O \rightarrow \min, \quad (2)$$

где C_{PE3} – суммарные затраты на операцию резания, руб;

$$C_{PE3} = k_0 t_{PE3}, \quad (3)$$

k_0 – прямые затраты на единицу времени резания, руб/мин;

C_{BC} – затраты на холостую работу оборудования, время установки и снятия, руб;

C_{CI} – затраты на смену инструмента, руб;

C_H – затраты на режущий инструмент, руб.

$$C_H = k_1 \frac{t_{PE3}}{T_p}, \quad (4)$$

k_1 – прямые затраты на единицу времени резания, руб/мин;

T_p – стойкость режущего инструмента, мин.

В общем случае, для решения задачи оптимизации режимов обработки зубчатых колес стандартного и специального профиля можем пренебречь значениями C_{BC} и C_{Si} и использовать зависимость 5.

$$C_{O1} = k_{PE3} \left(k_0 + k_1 \frac{1}{T_p} \right), C_{O1} \rightarrow \min. \quad (5)$$

III. Критерии, характеризующие результат обработки.

В классических подходах к оптимизации резания целевой функцией выступает экономическая эффективность процесса. Однако при оптимизации процессов обработки специальных и стандартных зубчатых колес такой подход к определению целевой функции не всегда может быть эффективен и направлен на решения реальных производственных задач.

Обработка зубчатых профилей является наиболее сложной и ответственной технологической операцией, на которую приходится до 70% времени обработки детали [12]. Зачастую зубонарезание выполняется на специальном станке, наложенном на производство конкретного изделия, а сами колеса выпускаются мелкими сериями. Оборудование не имеет полной загрузки, а рабочие, занятые на изготовлении зубчатых колес, получают заработную плату в зависимости от плана выпуска, а не от количества изготовленных единиц деталей. Эти факты приводят к тому, что оптимизация по критериям максимальной производительности или минимальной стоимости процесса не является эффективной.

В то же время для производителя становятся определяющими параметры процесса или характеристики готового изделия, например для увеличения срока службы изделия и снижения уровня шума необходимо добиваться минимальной шероховатости, для увеличения кинематической точности и долговечности приводов необходимо снизить суммарную погрешность обработки. Следовательно, в качестве целевой функции можно рассмотреть шероховатость и погрешность обработки стремящиеся к минимуму, зависимости 6 и 7:

$$R_a \rightarrow \min, \quad (6)$$

$$\Delta_{\Sigma} \rightarrow \min. \quad (7)$$

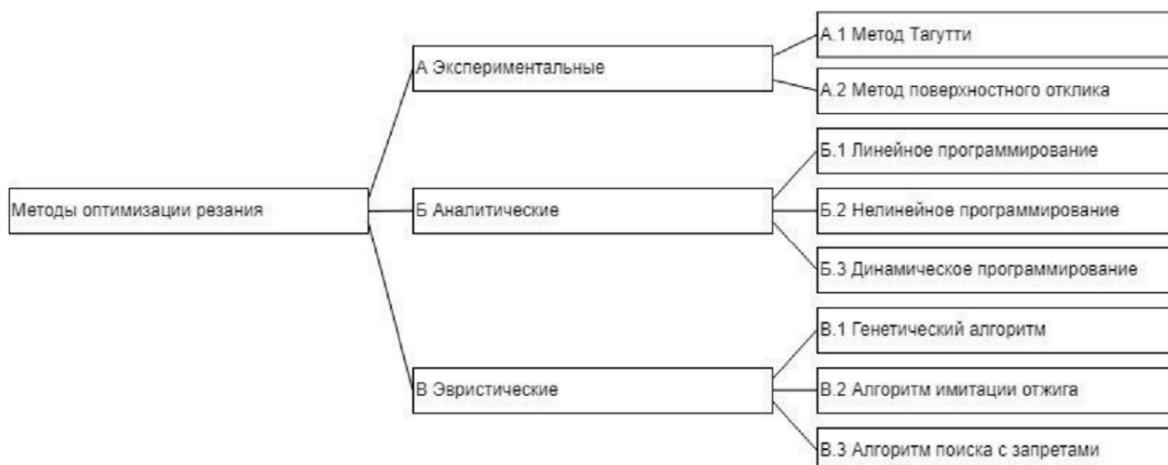
С учетом того, что точность и качество прямо зависят от физических параметров процесса, то для упрощения процесса оптимизации в качестве функций оптимизации можно рассмотреть максимальную силу резания и температуру, зависимости 8 и 9.

$$F_{\max} \rightarrow \min, \quad (8)$$

$$T_{\max} \rightarrow \min. \quad (9)$$

2.2 Разработка оптимационной модели.

Исследователями было разработано множество методов для решения задачи оптимизации процессов механической обработки (см. рисунок 2).



Для оптимизации применяются следующие методы:

- 1) Экспериментальные (метод Тагучи, метод поверхности отклика);
- 2) Аналитические (линейное программирование, нелинейное программирование и динамическое программирование);
- 3) Эвристические (генетический алгоритм, алгоритм поиска с запретами, алгоритм имитации отжига).

В то время как традиционные методы (экспериментальные и аналитические) пытаются обеспечить локальное оптимальное решение, разработанные нетрадиционные методы (эвристические), основанные на внешней модели или целевой функции, являются приближенными и пытаются обеспечить квазиоптимальные условия резания.

Технологические ограничения, используемые для оптимизации процесса обработки зубчатых колес стандартного и специального профиля:

- Упругие перемещения заготовки. Данный параметр позволяет комплексно учесть ограничения точности. Точность цилиндрических зубчатых колес в соответствии с ГОСТ 1643-81 определяется множеством показателей кинематической точности, плавности работы и контакта зубьев. Значения управляемых параметров точности зависят от упругих перемещений заготовки, происходящих в процессе обработки под действием силы резания. Стандартизованных норм точности для колес со специальным профилем зубьев не существует. В этих условиях в качестве универсального параметра, который позволит обобщить множество показателей точности предлагается использовать суммарную погрешность обработки, зависимость 10 [1].

$$\Delta_{\Sigma} = h_o + h_3 + f_o + f_3; \Delta_{\Sigma} \leq [\Delta_{\Sigma}] \quad (10)$$

где h_o – упругое отжатие оправки;
 h_3 – упругое отжатие заготовки;
 f_o – динамический прогиб оправки;
 f_3 – динамический прогиб заготовки.

- Шероховатость поверхности детали. Средняя высота профиля шероховатости является важнейшей характеристикой качества обрабатываемого профиля зубчатого колеса. Ограничения по данному параметру можно выразить зависимостью 11 [13].

$$R_a = 0,2(h_1 + h_2 + h_3 + h_4); R_a \leq [R_a] \quad (11)$$

где h_1 – составляющая, обусловленная геометрией инструмента и кинематикой резания;
 h_2 – составляющая, обусловленная колебаниями режущего инструмента;
 h_3 – составляющая, обусловленная пластическими деформациями;
 h_4 – составляющая, обусловленная шероховатостью инструмента.

- Стойкость зуборезного инструмента. Общими свойствами инструментов, используемых для нарезания зубчатого профиля (долбяки, червячные фрезы, резцовые головки и др.) являются: высокая стоимость и прямое влияние точности изготовления и степени износа инструмента на качественные характеристики изготавливаемой продукции. В этих условиях необходимо выделить технологическое ограничение по периоду стойкости режущего инструмента, зависимость 12 [1].

$$T_p = \frac{[h_p]}{n \Delta h_p}; T_p \geq [T_p], \quad (12)$$

где $[h_p]$ – допустимый размерный износ;
 n – частота рабочего хода в минуту;
 Δh_p – суммарный радиальный износ участка режущего лезвия за рабочий ход.

- Кинематические ограничения. Максимальные и минимальные возможные значения скорости резания и подачи, определяющиеся кинематикой станка, выражения 13 и 14.

$$V_{\min} \leq V \leq V_{\max}, \quad (13)$$

$$S_{\min} \leq S \leq S_{\max}. \quad (14)$$

Ряд других распространенных условий, таких как: ограничение по максимальной мощности станка, ограничение по максимальному крутящему моменту, ограничение по

прочности слабого звена, ограничение по прочности режущего инструмента и др. для упрощения моделирования, предлагается не рассматривать и допустить, что они не окажут значимого влияния на результаты расчетов. Данное допущение делается из соображений того, что представленные ограничения имеют место при оптимизации черновых операций, когда снимается большой объем стружки за один проход. В случае исследования процессов черновой обработки и обработки крупномодульных зубчатых колес необходимо использовать перечисленные ограничения в качестве проверочных.

2.3 Верификация оптимизационной модели. Разработанная модель испытывается для некоторых случаев обработки и производится оценка прогнозируемых результатов. В случае необходимости проводится серия экспериментальных исследований с целью верификации разработанного подхода к оптимизации.

2.4 Определение оптимальных параметров процесса. На данном этапе происходит использование разработанной оптимизационной модели для расчета оптимальных/квазиоптимальных параметров процесса резания, выявленных на первоначальном этапе.

Заключение

В статье представлен универсальный метод оптимизации процесса резания зубчатых колес стандартного и специального профиля, основанный на системном моделировании взаимодействия конструктивно-технологических параметров технологической системы и производственных характеристик. В работе выделены некоторые возможные целевые функции характерные для обработки зубчатых профилей и отличные от стандартных используемых при оптимизации резания, а именно шероховатость и погрешность обработки, стремящиеся к минимуму. Отличительной особенностью предложенного подхода является предположение о возможности замены части необходимых натурных испытаний на виртуальные экспериментальные исследования в среде конечно-элементного анализа. Это позволит сократить материальные и временные издержки на проектирование технологических процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарапанов, А.С. Управление процессом зубодолбления [Текст] / А.С. Тарапанов, Г.А. Харламов – М.: Машиностроение, 1999.– 128 с.
2. Полохин, О.В. Исследование и проектирование процессов зубонарезания инструментами червячного типа [Текст] / О.В. Полохин, А.С. Тарапанов, Г.А. Харламов – М.: Машиностроение – 1 , 2006, 141 с.
3. Anisimov R., Tarapanov A. Design of the tool for periodic not evolvent profiles //MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences, 2017. – Т. 129. – С. 01039.
4. Стеблецов Ю. Н. Прогнозирование параметров обработки зубчатых колес передачи новикова с помощью математического моделирования //Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2010. – №. 2-3. – С. 83-86.
5. Arrazola P. J. et al. Recent advances in modelling of metal machining processes //Cirp Annals. – 2013. – Т. 62. – №. 2. – С. 695-718.
6. Пашментова А. С., Канатников Н. В., Канатникова П. А. Аналитико-численное моделирование процесса обработки неэвольвентных зубчатых колес //Информационные технологии в науке, образовании и производстве (ИТНОП-2018). – 2018. – С. 199-203.
7. Канатников Н. В. и др. Методика гибридного прогностического моделирования лезвийной обработки зубчатых колес стандартного и специального профиля //Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2018. – №. 2. – С. 41-49.
8. Канатников Н. В. и др. Прогнозирование силы резания, возникающей при обработке неэвольвентных зубчатых колес //Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2019. – №. 2. – С. 27-33.
9. Grigorev S. N. et al. Influence of Tool Design on the Cutting Force in the Machining of Noninvolute Gears //Russian Engineering Research. – 2020. – Т. 40. – №. 4. – С. 316-319.
10. Канатников Н. В. и др. Влияние геометрии профиля зубьев конического колеса на тепловые явления, сопровождающие процесс резания //СТИН. – 2020. – №. 6. – С. 10-13.
11. Kanatnikov N. V. et al. Thermal influence of the tooth geometry in milling a conical gear //Russian Engineering Research. – 2020. – Т. 40. – №. 11. – С. 942-944.
12. Калашников С. Н. и др. Производство зубчатых колес. Справочник. – 1990.
13. Суслов, А.Г. Инженерия поверхности деталей [Текст] / А.Г. Суслов – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.

Канатников Никита Владимирович

ФГБОУ ВПО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орёл
Кандидат технических наук, доцент
302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29
E-mail: NKanatnikov@yandex.ru

Радченко Сергей Юрьевич

ФГБОУ ВПО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орёл
Доктор технических наук, профессор, проректор
302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29
E-mail: radsu@rambler.ru

KANATNIKOV N.V., RADCHENKO S.Y.

A METHOD FOR OPTIMIZING THE MACHINING PROCESS BY CUTTING GEARS OF STANDARD AND SPECIAL PROFILES

Abstract. This paper presents a method for optimizing the edge machining process of gear rims with standard and special profiles. A hybrid model of the machining process is proposed that combines analytical, numerical, and empirical modeling approaches, enabling the derivation of a complex set of relationships describing the physical phenomena accompanying the cutting process and predicting practical machining results. In the subsequent step, within the framework of optimizing specified output parameters, this approach allows solving the inverse modeling problem – determining the optimal adjustable design and technological parameters of the process.

Keywords: gear machining, cutting, cutting modeling, cutting optimization.

BIBLIOGRAPHY

1. Tarapanov, A.S. Upravlenie protsessom zubodolbeniya [Tekst] / A.S. Tarapanov, G.A. Kharlamov – M.: Mashinostroenie, 1999.– 128 p.
2. Polokhin, O.V. Issledovanie i proektirovanie protsessov zubonarezaniya instrumentami cherviachnogo tipa [Tekst] / O.V. Polokhin, A.S. Tarapanov, G.A. Kharlamov – M.: Mashinostroenie – 1, 2006, 141 p.
3. Anisimov R., Tarapanov A. Design of the tool for periodic not evolvent profiles //MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences, 2017. – T. 129. – P. 01039.
4. Stebletsov Yu. N. Prognozirovaniye parametrov obrabotki zubchatykh koles peredachi novikova s pomoshchyu matematicheskogo modelirovaniya //Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2010. – №. 2-3. – P. 83-86.
5. Arrazola P. J. et al. Recent advances in modelling of metal machining processes //Cirp Annals. – 2013. – T. 62. – №. 2. – P. 695-718.
6. Pashmentova A. S., Kanatnikov N. V., Kanatnikova P. A. Analitiko-chislennoe modelirovaniye protsessa obrabotki neevolventnykh zubchatykh koles //Informatsionnye tekhnologii v naуke, obrazovanii i proizvodstve (ITNOP-2018). – 2018. – P. 199-203.
7. Kanatnikov N. V. et al. Metodika gibrnidnogo prognozicheskogo modelirovaniya lezvijnoi obrabotki zubchatykh koles standarnogo i spetsialnogo profilya //Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2018. – №. 2. – P. 41-49.
8. Kanatnikov N. V. et al. Prognozirovaniye sily rezaniya, voznikayushchei pri obrabotke neevolventnykh zubchatykh koles //Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2019. – №. 2. – P. 27-33.
9. Grigorev S. N. et al. Influence of Tool Design on the Cutting Force in the Machining of Noninvolute Gears //Russian Engineering Research. – 2020. – T. 40. – №. 4. – P. 316-319.
10. Kanatnikov N. V. et al. Vliyanie geometrii profilya zubev konicheskogo kolesa na teplovye yavleniya, soprovozhdayushchie protsess rezaniya //STIN. – 2020. – №. 6. – P. 10-13.
11. Kanatnikov N. V. et al. Thermal influence of the tooth geometry in milling a conical gear //Russian Engineering Research. – 2020. – T. 40. – №. 11. – P. 942-944.
12. Kalashnikov S. N. et al. Proizvodstvo zubchatykh koles. Spravochnik. – 1990.
13. Suslov, A.G. Inzheneriya poverkhnosti detalei [Tekst] / A.G. Suslov – M.: Mashinostroenie, 2008. – 320.

Kanatnikov Nikita Vladimirovich

«Orel State University», Orel
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
E-mail: NKanatnikov@yandex.ru

Radchenko Sergey Yurievich

«Orel State University», Orel
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Vice-Rector
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
E-mail: radsu@rambler.ru

ДОЛОГЛОНЯН А.В., МАТВЕЕНКО В.Т., КЛИМЕНКО А.Г.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИБРИДНЫХ МИКРОГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК С ИНТЕГРИРОВАННЫМ ФОКУСИРУЮЩИМ СОЛНЕЧНЫМ КОЛЛЕКТОРОМ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА

Аннотация. Предметом рассмотрения в статье являются использование фокусирующего (параболоцилиндрического) солнечного коллектора (ФСК) для повышения эффективности микрогазотурбинных двигателей (МГТД) различной конфигурации. Исследованы гибридные солнечные микрогазотурбинные установки на базе МГТД простого цикла (ПЦ) и ПЦ с турбокомпрессорным утилизатором (ТКУ) для климатических условий Севера. Определено, что наиболее экономичной конфигурацией МГТД для интегрирования ФСК является комбинация простого цикла с турбокомпрессорным утилизатором, поскольку позволяет наиболее полно реализовать потенциал ФСК. Установлено, что комбинация МГТД ПЦ с ТКУ с интегрированным ФСК позволяет увеличить среднегодовой коэффициент использования топлива таких установок в условиях Севера на 6...7 %, сохранив при этом когенерационные возможности.

Ключевые слова: микрогазотурбинная установка, микротурбина, фокусирующий солнечный коллектор, турбокомпрессорный утилизатор.

Введение

Концентрация солнечной энергии (КСЭ) может поставлять управляемую энергию по запросу потребителям. Благодаря интеграции гибридизации или накоплению тепловой энергии, установки КСЭ могут продолжать вырабатывать электроэнергию во время облачности или ночью, что делает их подходящими для формирования основы низкоуглеродной энергосистемы [1], обеспечивая надежную генерирующую мощность для поддержки других технологий возобновляемых источников энергии, таких как солнечная фотоэлектрическая энергия и ветер.

В центре проблем, с которыми сталкивается КСЭ, является тот факт, что значительная часть (~ 80 %) всей установленной мощности по-прежнему основано на технологии параболического желоба [2] и установки КСЭ с параболическим желобом используют энергоблоки цикла Ренкина с низкотемпературными (ниже 400 °C) паровыми турбинами, которые работают с относительно низким КПД (~ 35 % при воздушном охлаждении [3]).

В солнечном гибридном цикле Ренкина энергия солнца используется для непосредственного производства пара или за счет использования промежуточного теплоносителя [4]. Замкнутые циклы Брайтона уже используют внешний источник тепла [5]. В гибридных открытых циклах Брайтона солнечная тепловая энергия используется для предварительного нагрева воздуха перед его поступлением в камеру сгорания. Проекты и исследования, финансируемые ЕС, демонстрируют предварительный нагрев воздуха солнечной энергией с помощью поля гелиостата и приемника [6]. В проекте SOLUGAS [6] решены основные проблемы конструкции и эксплуатации при гибридизации газовых турбин.

Согласно исследованиям и результатам экспериментальных проектов [6, 7], предварительный подогрев воздуха на входе в камеру сгорания приводит к уменьшению количества топлива, необходимого для достижения требуемой температуры на входе в турбину (T_3). Однако выходная мощность при заданной T_3 несколько снижается по сравнению с работой только на органическом топливе. Это вызвано дополнительной потерей давления в фокусирующем солнечном коллекторе (ФСК) и измененным составом газов на выходе из камеры сгорания. Поскольку используется меньшее количество топлива, удельная массовая теплоемкость c_p выхлопных газов меньше, чем при работе только на органическом топливе, что приводит к меньшей разнице энталпий при одинаковом перепаде температуры и, следовательно, меньшей выходной мощности. Кроме того, камера сгорания должна быть модифицирована, чтобы выдерживать большие термические напряжения, вызванные более высокой температурой воздуха на ее входе. Камеру сгорания следует перепроектировать с

учетом рабочего диапазона от максимального до почти нулевого расхода топлива, что является серьезной технической задачей.

Эффективность гибридной солнечной газотурбинной установки (ГСГТУ) зависит как от эффективности ФСК, так и газотурбинного двигателя (ГТД). Высокая эффективность ФСК достигается максимизацией его оптических характеристик и минимизацией его тепловых и гидравлических потерь. Высокая эффективность ГТД достигается за счет максимизации эффективности его компонентов (компрессора, турбины, камеры сгорания и пр.), а также схемы и параметров (степень повышения давления в компрессоре, T_3 и пр.) двигателя.

Очевидно, что высокоширотное расположение значительных территорий России означает существенную сезонную неравномерность поступления энергии солнечного излучения и вносит некоторые ограничения по эффективному ее использованию, прежде всего в зимний сезон с относительно малой продолжительностью солнечного сияния (или его отсутствием в заполярных областях). Известно, что для любой точки земного шара суммарные годовые продолжительности дня и ночи равны между собой. Это означает, что если в зимнее время продолжительность светового дня в условиях России сокращается, то в летнее время она увеличивается, и сопровождается повышением поступления солнечной энергии. По данным [8], для среднедневного поступления прямого солнечного излучения на единичную перпендикулярную солнечным лучам поверхность в период с апреля по сентябрь в некоторых районах страны приход солнечной энергии достигает $6,5\ldots7,0 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^2\cdot\text{день})$, что соответствует максимальным среднедневным поступлениям солнечной энергии в наиболее солнечных районах экваториальной зоны земного шара. Следует отметить, что максимальная суммарная солнечная радиация в этот период года приходится на Сибирь, что связано с действием в этом районе антициклона, обеспечивающим снижение облачности и повышение прозрачности атмосферы.

В данной работе будет рассмотрена ГСГТУ на базе параболоцилиндрического ФСК в сочетании с микрогазотурбинными двигателями (МГТД) для климатических условий г. Якутск, которые характеризуются кроме высокого прихода солнечной радиации еще и большим сезонным перепадом температур с целью определения влияния сильно изменяющихся климатических факторов на эффективность энергетической установки.

Базовые схемы газотурбинных двигателей, работающих на органическом топливе

Проведенные в [9] исследования показали, что технико-экономической точки зрения для использования в составе ГСГТУ являются МГТД без регенерации теплоты, а оптимальная площадь апертуры ФСК составляет $1200\ldots1800 \text{ м}^2$ на $1 \text{ кг}/\text{с}$ расхода циклового воздуха в зависимости от степени повышения давления в компрессоре. Там же было показано, что:

- использование ФСК экономически целесообразно при высоких ценах на энергетические ресурсы и в регионах, удаленных от стационарных линий электропередач и поставок природного газа.

- при высоких ценах на отпускаемые тепло и электроэнергию возможна быстрая окупаемость гибридных установок с использованием ФСК.

- использование дешевого топлива позволяет очень быстро окупать когнегенерационные микрогазотурбинные установки (МГТУ) без ФСК получая сверхприбыль, которую можно использовать для включения ФСК в состав установки для снижения углеродного следа при обеспечения нулевой себестоимости.

За основу базовой схемы микрогазотурбинного двигателя принят ГТД простого цикла (см. рисунок 1), который является одновальным для привода электрогенератора.

Усложнение ГТД простого цикла (ПЦ) предлагается рассмотреть за счет применения турбины перерасширения рабочего тела за силовой турбиной [10-13] с целью повышения мощности ГТД (см. рисунок 2);

На рисунке 2 изображена схема МГТУ с турбиной перерасширения. Турбина перерасширения, приводящая дожимающий компрессор (ДК) с охладителем газа (ОГ1) между ними, который выполняет роль котла-utiлизатора, образует турбокомпрессорный утилизатор (ТКУ). Посредством применения в рабочем цикле перерасширения рабочих газов в силовой турбине увеличивается мощность двигателя при том же расходе топлива и, следовательно,

повышается КПД двигателя.

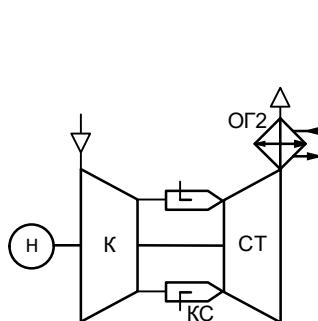


Рисунок 1 – Схема когенерационной МГТУ простого цикла: К – компрессор; КС – камера сгорания; Т – турбина; ОГ2 – охладитель газов; Н – нагрузка

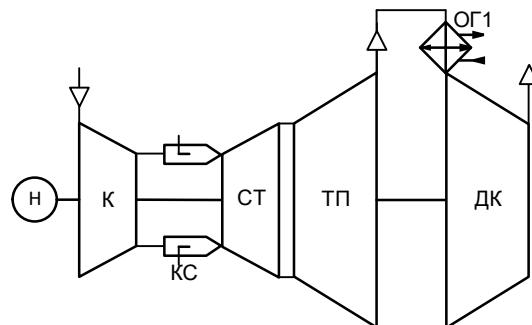


Рисунок 2 – Схема МГТУ с турбокомпрессорным утилизатором (ПЦ+ТКУ): ТП – турбина; ОГ1 – охладитель газов; ДК – дожимающий компрессор; остальные обозначения, как на рисунке 1

Исследование характеристик рабочих циклов МГТД производилось с использованием физико-математических моделей и программного обеспечения, ранее опробованного при анализе параметров в ГТУ, приведенных в работе [10].

Для моделирования установок, изображенных на рисунках 1-2, были приняты параметры, представленные в таблице 1.

Таблица 1 - Параметры 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 ¹	–	0,9
Адиабатный КПД дожимающего компрессора ²	–	0,88
КПД камеры сгорания	–	0,99
КПД электрогенератора	–	0,96
Коэффициент восстановления давления на входе в установку, ε_{ex}	–	0,96
Коэффициент восстановления давления в КС, ε_{ks}	–	0,96
Коэффициент восстановления давления на выходе из установки, $\varepsilon_{vых}$	–	0,97
Коэффициент восстановления давления охладителей газа (ОГ1 и ОГ2), $\varepsilon_{o21}, \varepsilon_{o22}$	–	0,96
Температура газов на выходе из ОГ1 и ОГ2	К	323
Температура окружающего воздуха	К	288
Влажность окружающего воздуха	%	60

Примечания

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.

Кроме того, для МГТУ были приняты следующие ограничения по параметрам:

- максимальная степень сжатия в одной ступени центробежного компрессора – 12 [14];
 - максимальная степень расширения в одной ступени турбины – 5 (радиально-осевая турбина) и 6 (центро斯特ремительная турбина).
- максимальная степень сжатия в компрессоре ТКУ – 3,5 (для снижения массогабаритных показателей ОГ1).

Результаты исследования характеристик МГТУ

Анализ характеристик циклов МГТУ производился при изменении степени повышения давления π_k в компрессоре двигателя, дожимающем компрессоре π_{dk} и прочих равных фиксированных параметрах, характерных для микрогазотурбинных установок. Результаты такой оптимизации МГТУ, работающих по схемам, приведенным на рисунках 1-2, представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Результаты [15] оптимизации когенерационных вариантов МГТУ при $T_3 = 1373$ К

Наименование параметра	Ед. изм.	ПЦ	ПЦ+ТКУ
Эффективный КПД МГТУ	%	27,2	35,0
Температура газов на входе в охладитель газов	К	837	631
Оптимальная степень повышения давления в компрессоре	–	12	12
Оптимальная степень повышения давления в ДК	–	–	3,5
Удельная мощность на валу силовой турбины	кДж/кг	228	293
Удельная тепловая мощность	кДж/кг	544	320
КПД теплотехнический	%	91	73

Анализ таблицы 2 показывает, что при оптимальных степенях повышения давления π_k в МГТУ на базе ПЦ+ТКУ полностью подходит под параметры существующего оборудования по π_k , кроме того, имеет более высокую экономичность относительно МГТУ на базе ПЦ на 7,8 %, удельная мощность увеличивается в 1,29 раза, при этом тепловая мощность падает в 1,7 раза. Увеличение удельной мощности единицы рабочего тела в цикле двигателя положительно влияет на массовые и габаритные показатели энергоустановки, особенно, включающей теплообменное оборудование. Наибольшим теплотехническим КПД обладает МГТУ на базе ПЦ, что очень важно в условиях Севера, а наибольшей удельной мощностью – МГТУ на базе ПЦ+ТКУ.

Солнечный коллектор

Исследование характеристик ФСК производилось с использованием физико-математических моделей, приведенных в работах [16, 17].

Для моделирования параболоцилиндрического ФСК были приняты параметры, представленные в таблице 3. В качестве климатических параметров использовались данные работы [18] для г. Якутск.

Использование воздуха в качестве теплоносителя обусловлено высокими (650…1000 К) температурами на выходе ФСК, при которых известные термомасла разлагаются, а жидкости закипают. Воздух как теплоноситель создает и определенные трудности, связанные с эффективностью ФСК. Уравнение для определения полезной энергии, произведенной ФСК имеет вид [19]:

$$Q_u = F' \eta_0 I A_s - F' U_L (T_f - T_a) A_p, \quad (1)$$

где η_0 – оптический КПД ФСК;

I – интенсивность прямой солнечной радиации, приходящей на ФСК, Вт/м²;

A_s – площадь апертуры ФСК, м²;

F' – коэффициент эффективности приемника;

U_L – коэффициент тепловых потерь приемника, Вт/(м² К);

T_f – средняя температура теплоносителя, К;

T_a – температура окружающей среды, К;

A_p – площадь поверхности абсорбера, м².

Коэффициент эффективности приемника в формуле (1) и определяет эффективность ФСК и любого другого коллектора в целом, находится по выражению

$$F' = \frac{1}{1 + U_L / U_f}, \quad (2)$$

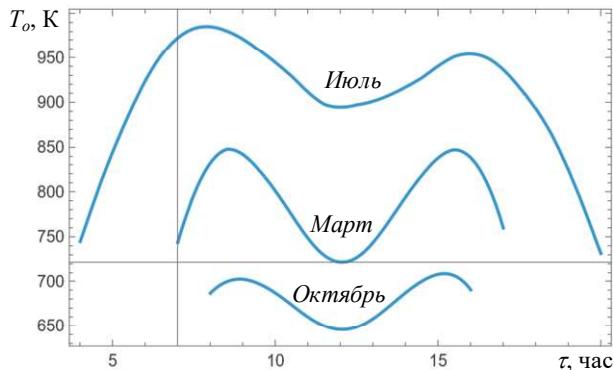
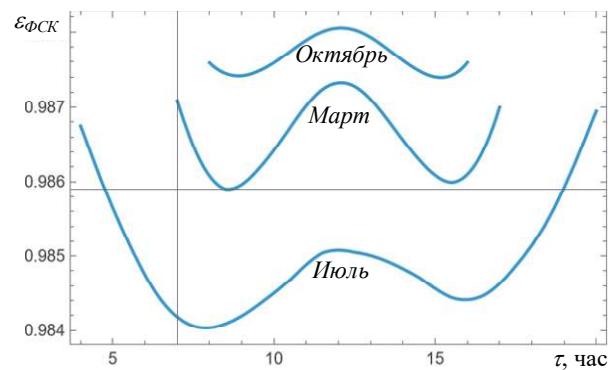
где U_f – коэффициент теплоотдачи от абсорбера к теплоносителю, Вт/(м² К).

Из формулы (2) видно, что при $U_f \gg U_L$ коэффициент эффективности приемника стремится к единице, а поскольку коэффициент теплоотдачи пропорционален теплопроводности теплоносителя, теплоносители стараются выбирать с высоким ее значением. У воздуха коэффициент теплопроводности очень мал, поэтому, чтобы это компенсировать необходимо увеличить скорость течения теплоносителя в абсорбере, для чего следует уменьшить его поперечное сечение, что, соответственно, увеличит гидравлическое сопротивление ФСК.

Результаты моделирования параболоцилиндрического ФСК для различных сезонов при средней облачности представлены на рисунках 3 и 4.

Таблица 3 - Параметры ФСК

Наименование параметра	Ед. изм.	Численное значение
Угол раскрытия	—	$\pi/2$
Размер раскрытия зеркала концентратора	м	2
Фокусное расстояние	м	0,5
Наружный диаметр абсорбера	мм	25,4
Наружный диаметр приемника (вакуумированная трубка, металлическая сильфонная с каждой стороны для достижения необходимого вакуума)	мм	50
Пропускательная способность прозрачной изоляции	—	0,97
Поглощательная способность абсорбера	—	0,97
Излучательная способность прозрачной изоляции	—	0,86
Излучательная способность абсорбера [112]	—	$(1,666 \cdot 10^{-4}) T + 3,375 \cdot 10^{-3}$
Отражательная способность зеркала	—	0,935
Ошибка поворота и отслеживания	—	0,994
Точность геометрии зеркал коллектора	—	0,980
Замутнение зеркала	—	0,968
Грязь на элементах сбора тепла	—	0,984
Прочие факторы, влияющие на оптические параметры	—	0,960
Ориентация	—	Север-Юг
Приведенный расход теплоносителя	кг/с	1
Род теплоносителя	—	воздух

Рисунок 3 – Зависимость температуры теплоносителя (T_0) от времени суток (τ) и сезона для МГТУ на базе ПЦ и площади ФСК 1800 м².Рисунок 4 – Зависимость коэффициента восстановления давления в ФСК ($\varepsilon_{\text{ФСК}}$) от времени суток (τ) и сезона при давлении на входе $p \approx 1,2 \text{ Mpa}$, числе параллельных потоков $n_f = 2$ и площади ФСК 1800 м².

Не трудно заметить, что рисунки 3 и 4 зеркально похожи относительно оси τ . Это связано с тем, что гидравлическое сопротивление газов в канале, как показано, например, в работе [20] практически прямо пропорционально температуре теплоносителя.

$$\Delta P(T, P) = \frac{\xi_g}{8} \frac{R T}{p} \frac{F}{S} \left(\frac{G}{S} \right)^2, \quad (3)$$

где ξ_g – коэффициент гидравлического сопротивления;

S – площадь проходного сечения канала, м²;

F – площади поверхности канала, м²;

G – расход теплоносителя, кг/с; R – индивидуальная газовая постоянная, Дж/(кг К);

T – температура газа, К;

p – давление газа, Па.

Очевидно, коэффициент гидравлического сопротивления в формуле (3) тоже зависит от температуры, но зависимость эта мала, поскольку для турбулентного режима течения он пропорционален динамическому коэффициенту вязкости ($\mu \sim T$) в степени 0,2 [21], т.е. при изменении температуры газа в 2 раза он изменится на 15 %.

Кроме того, формула (3) наглядно показывает, что для газа гидравлические потери в канале обратно пропорциональны его давлению и прямо пропорциональны температуре. Поскольку коэффициента восстановления давления в ФСК определяется формулой

$$\varepsilon_{\Phi CK} = 1 - \frac{\Delta p}{p},$$

то естественно, что рисунок 4 зеркален рисунку 3.

Из вышесказанного очевидно, что подключать ФСК к ГТД нужно в точке с наибольшим давлением и наименьшей температурой (это важно и сточки зрения эффективности ФСК). Для нерегенеративных циклов (см. рисунки 1 и 2) эта точка находится непосредственно за компрессором перед камерой сгорания.

Результаты исследования характеристик гибридных солнечных МГТУ

Схемы гибридных солнечных МГТУ, составленные в соответствии с установленным выше подходом, представлены на рисунках 5-6.

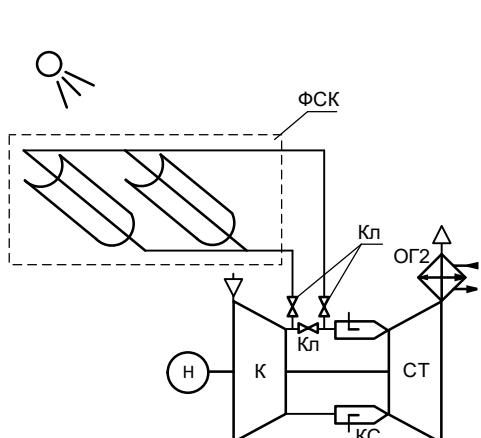


Рисунок 5 – Схема когенерационной гибридной солнечной МГТУ ПЦ: ФСК – фокусирующий солнечный коллектор; Кл – переключающиеся клапаны; остальные обозначения, как на рисунке 1

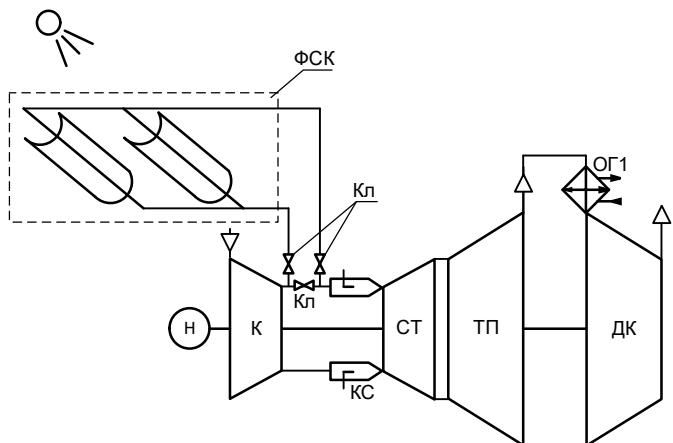


Рисунок 6 – Схема когенерационной гибридной солнечной МГТУ ПЦ+ТКУ: обозначения, как на рисунках 1 и 5

Исследование характеристик рабочих циклов МГТД производилось с использованием физико-математических моделей и программного обеспечения, ранее опробованного при анализе параметров в МГТУ, приведенных в работах [10, 22].

Установки, изображенные на рисунках 5 и 6, были исследованы при стандартных условиях в работе [23]. Однако, реальные климатические условия могут вызывать серьезные колебания базовых параметров работы гибридных солнечных МГТУ, как на собственно МГТД, так и на установку ОЦР. Влияние температуры окружающей среды на эффективность ГТД исследовано в работе [24, 25]. В данной статье исследована работа МГТД при постоянных максимальной температуре цикла (T_3) и приведенном расходе воздуха ($G_{np} = G\sqrt{T_a / 288}$, G – физический расход воздуха, кг/с), а также при винтовом способе регулирования (ВСР).

Температура окружающей среды и относительная влажность [18] для г. Якутск (см. рисунок 7) определялись по формулам

$$t_a = -30,5 - 17,4n + 10,5n^2 - 1,33n^3 + 0,0477n^4, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (4)$$

$$\varphi = 82,866 - 1,4t_a + 0,00886t_a^2 - 0,0000246t_a^3 - 2,53 \times 10^{-8}t_a^4, \quad (5)$$

где n – номер текущего месяца;

t_a – температура окружающего воздуха, °С.

При необходимости МГТД работать в режиме постоянной мощности его относительные параметры будут зависеть от температуры окружающей среды как это представлено на рисунке 8 для машины простого цикла. При работе с постоянным приведенным расходом относительные параметры МГТД ПЦ при различных способах нагружения представлены на рисунке 9.

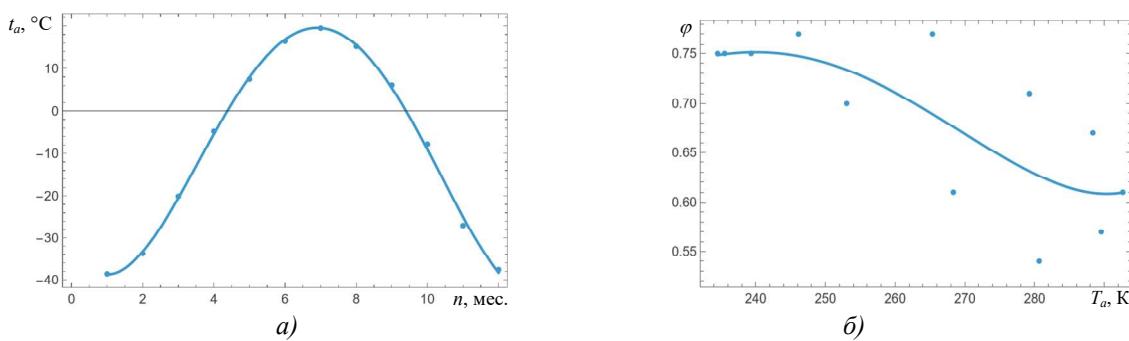


Рисунок 7 – Среднемесячные температура и относительная влажность окружающей среды г. Якутск: а) зависимость температуры окружающей среды от календарного месяца; б) зависимость относительной влажности окружающей среды от температуры

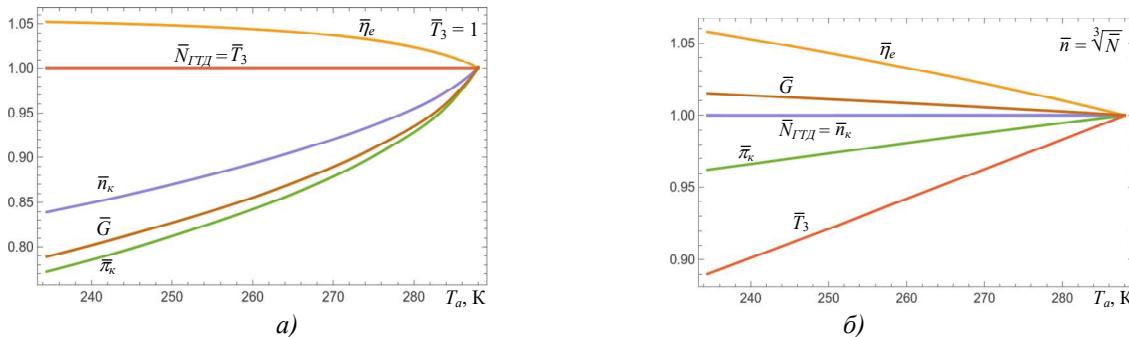


Рисунок 8 – Зависимость относительных параметров от температуры окружающего воздуха МГТД на базе ПЦ при постоянной мощности: а) изотермический способ нагружения; б) винтовой способ нагружения

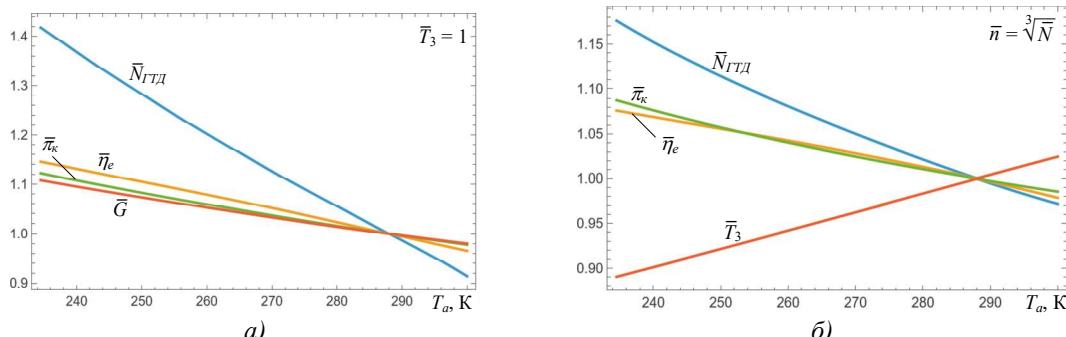


Рисунок 9 – Зависимость относительных параметров от температуры окружающего воздуха МГТД на базе ПЦ при постоянном приведенном расходе воздуха: а) изотермический способ нагружения; б) винтовой способ нагружения

На рисунках 8 и 9 относительные параметры определены по формулам:

- относительный расход наружного воздуха

$$\bar{G} = \frac{G}{G_0},$$

где G – расход рабочего тела через компрессор при текущей температуре окружающего воздуха, кг/с;

G_0 – расход рабочего тела через компрессор при стандартных условиях, кг/с;

- относительная степень повышения давления в компрессоре

$$\bar{\pi}_k = \frac{\pi_k}{\pi_{k0}},$$

где π_k – степень повышения давления в компрессоре при текущей температуре окружающего воздуха;

π_{k0} – степень повышения давления в компрессоре при стандартных условиях;

- относительная мощность МГТД

$$\bar{N}_{GTД} = \frac{N_{GTД}}{N_{GTД0}},$$

где $N_{GTД}$ – удельная (на единицу расхода воздуха) мощность МГТД при текущей температуре окружающего воздуха, кДж/кг;

$N_{GTД0}$ – удельная мощность МГТД на номинальном режиме при стандартных условиях, кДж/кг;

- относительный эффективный КПД когенерационной МГТУ

$$\bar{\eta}_e = \frac{\eta_e}{\eta_{e0}},$$

где η_e – эффективный КПД когенерационной МГТУ при текущей температуре окружающего воздуха;

η_{e0} – эффективный КПД когенерационной МГТУ при стандартных условиях;

- относительное число оборотов компрессора

$$\bar{n}_k = \frac{n_k}{n_{k0}},$$

где n_k – приведенные обороты компрессора при текущей температуре окружающего воздуха, с⁻¹;

n_{k0} – обороты компрессора при стандартных условиях, с⁻¹;

- относительная максимальная температура цикла МГТД

$$\bar{T}_3 = \frac{T_3}{T_{30}},$$

где T_3 – максимальная температура цикла МГТД при текущих условиях работы, К;

T_{30} – максимальная температура цикла МГТД при стандартных условиях работы, К;

Рисунок 8 показывает, что в случае обеспечения постоянной мощности МГТД ПЦ и изотермического способа регулирования при снижении температуры окружающего воздуха эффективность двигателя (рисунок 8а), возрастает, а другие параметры, отмеченные на рисунке, снижаются. В противном случае (рисунок 9а) мощность двигателя может возрасти на 40 % при незначительном относительном росте (порядка 8...10 %) π_k , η_e и G , что требует определенного запаса прочности конструкции МГТД. Для винтового способа регулирования (рисунок 8б) при снижении температуры окружающего воздуха характерно поддержание постоянной мощности при постоянном числе оборотов и некотором росте расхода воздуха и КПД, а также снижении π_k и T_3 . В случае отсутствия ограничений на мощность (рисунок 9б) при снижении температуры окружающего воздуха наблюдается рост мощности (до 18 %), π_k и эффективности МГТД (до 6 %) и уменьшение T_3 .

Для МГТД на базе ПЦ+ТКУ относительные параметры в режиме постоянной мощности будут зависеть от температуры окружающей среды как это представлено на рисунке 10. При работе с постоянным приведенным расходом относительные параметры двигателя при различных способах нагружения представлены на рисунке 11.

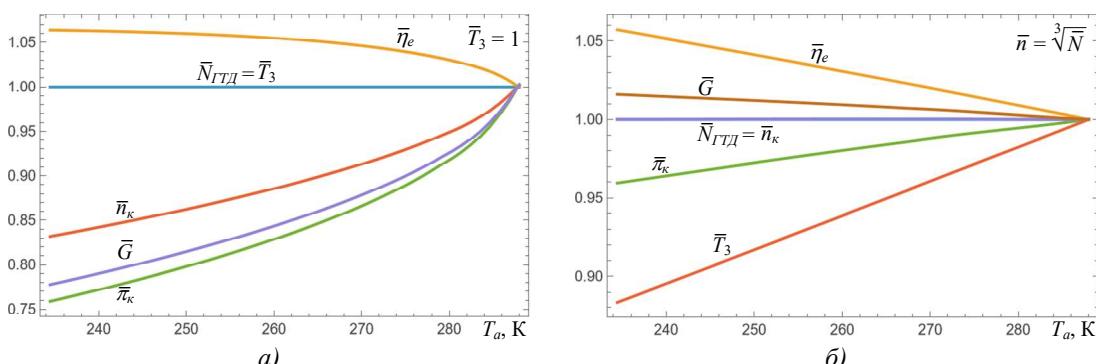


Рисунок 10 – Зависимость относительных параметров от температуры окружающего воздуха МГТД на базе ПЦ+ТКУ при постоянной мощности: а) изотермический способ нагружения; б) винтовой способ нагружения

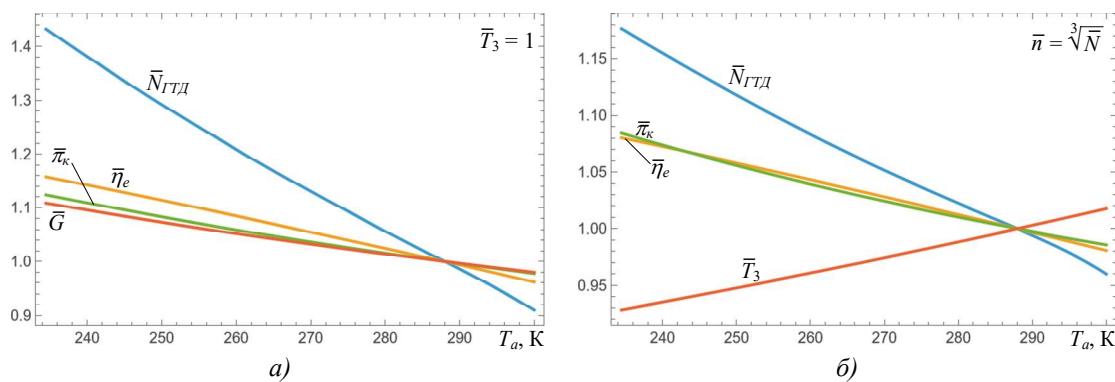


Рисунок 11 – Зависимость относительных параметров от температуры окружающего воздуха МГТД на базе ПЦ+ТКУ при постоянном приведенном расходе воздуха: а) изотермический способ нагружения; б) винтовой способ нагружения

Анализ рисунков 8-11 показывает, что работа МГТД при постоянном приведенном расходе воздуха более предпочтительна с точки зрения эффективности, однако требует определенного запаса прочности в связи с небольшим ростом степени повышения давления в компрессоре и числа его оборотов. МГТД на базе ПЦ+ТКУ ожидаемо показал несколько более высокие относительные эффективность и мощность по сравнению с двигателем на базе ПЦ. Учитывая, что подключение ФСК создает дополнительное гидравлическое сопротивление в воздушном тракте двигателя, дополнительный запас прочности окажется вполне уместным.

Поскольку согласно (3) гидравлические потери в ФСК обратно пропорциональны давлению, то гибридные солнечные МГТУ (см. рисунки 5 и 6) теряют часть мощности. При большой площади ФСК и малых π_k эти потери могут быть существенными настолько, что могут нивелировать прибавку к эффективности [23], которую обеспечивает подогрев воздуха в ФСК. Чтобы уменьшить эти потери до приемлемого для теплообменных аппаратов ГТД уровня (2...6 % [12]), необходимо распараллелить потоки воздуха (теплоносителя) в ФСК, однако это снижает скорость течения в приемнике и, соответственно его эффективность.

Введем параметр – среднедневной коэффициент использования топлива, представляющий собой отношение суммарной выработанной за солнечный день работы к затраченной на это теплоте сгорания топлива, который определяется формулой

$$\xi_m = \frac{\sum N_{ei}}{\sum_i Q_{fi}}, \quad (6)$$

где N_{ei} – эффективная мощность гибридной солнечной МГТУ для i -го солнечного часа, кВт;

Q_{fi} – тепловая мощность, полученная при сгорании топлива в гибридной солнечной МГТУ для i -го солнечного часа, кВт.

Учитывая (6) среднечасовой коэффициент использования топлива, определяется по формуле

$$\xi_i = \frac{N_{ei}}{Q_{fi}}. \quad (7)$$

Зависимости среднедневного коэффициента использования топлива ξ_m от количества потоков n_f и длины приемника L_c ФСК для исследуемых МГТУ представлены на рисунках 12 и 13.

Рисунки 12 и 13 показывают, что оптимальное количество параллельных потоков для обеих схем МГТУ равно 2. Ввиду достаточно высокой π_k для исследуемых МГТУ распараллеливание расхода воздуха на потоки не сильно влияет (в пределах 1 %) на топливную экономичность установок.

Результаты моделирования гибридной солнечной МГТУ на базе ГТД простого цикла в Июле при винтовом способе нагружения представлены на рисунке 14.

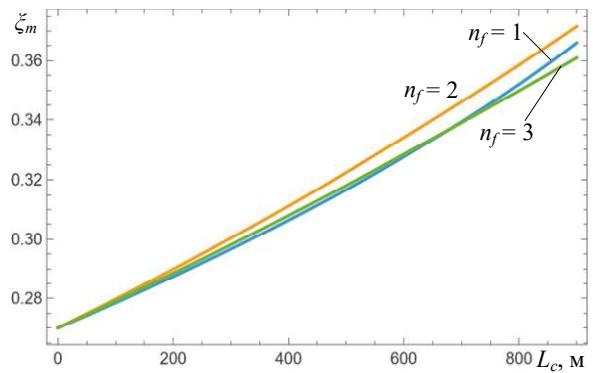


Рисунок 12 – Зависимость среднедневного коэффициента использования топлива ξ_m от количества потоков n_f и длины приемника L_c ФСК для гибридной солнечной МГТУ на базе ПЦ в Июле

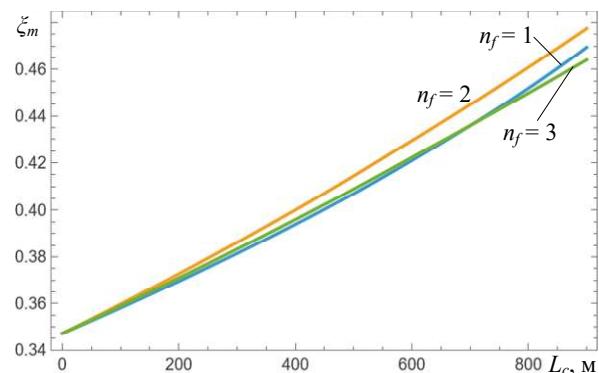


Рисунок 13 – Зависимость среднедневного коэффициента использования топлива ξ_m от количества потоков n_f и длины приемника L_c ФСК для гибридной солнечной МГТУ на базе ПЦ+ТКУ в Июле

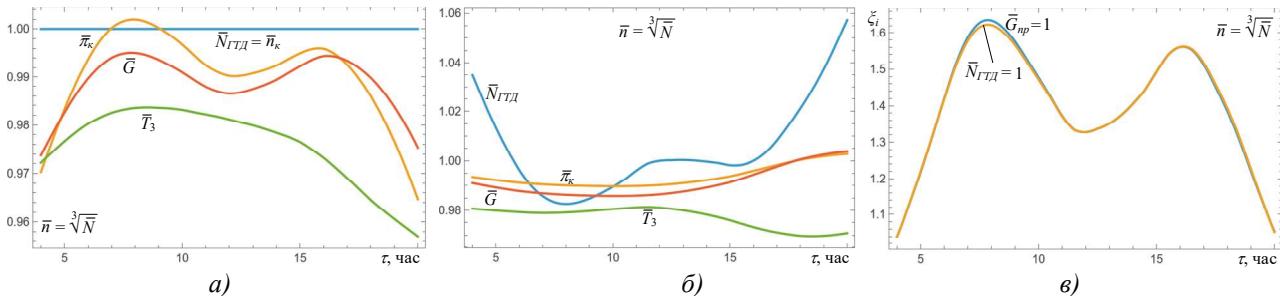


Рисунок 14 – Зависимость относительных параметров гибридной солнечной МГТУ на базе ПЦ от времени суток для Июля: а) при постоянной мощности; б) при постоянном приведенном расходе; в) сравнение эффективности этих режимов

Анализ рисунка 14 показывает, что в Июле месяце относительные параметры работы гибридной солнечной МГТУ на базе ПЦ мало отличаются от 1 (рисунки 14а и 14б) поскольку температура окружающего воздуха близка к номинальной. Поэтому режим постоянной мощности практически не отличается по эффективности от режима постоянного приведенного расхода, а сама топливная экономичность установки прямо зависит от интенсивности солнечного излучения, приходящего на апертуру ФСК (см. рисунок 14в).

Результаты моделирования гибридной солнечной МГТУ на базе ГТД простого цикла в Феврале при винтовом способе нагружения представлены на рисунке 15.

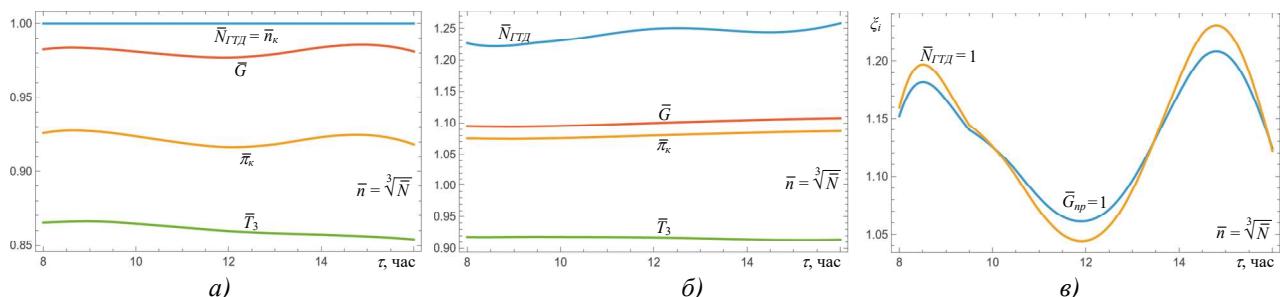


Рисунок 15 – Зависимость относительных параметров гибридной солнечной МГТУ на базе ПЦ от времени суток для Февраля: а) при постоянной мощности; б) при постоянном приведенном расходе; в) сравнение эффективности этих режимов

Анализ рисунка 15 показывает, что в Феврале месяце относительные параметры работы гибридной солнечной МГТУ на базе ПЦ в режиме постоянной мощности снижаются из-за падения температуры окружающего воздуха (рисунок 14а), а в режиме постоянного приведенного расхода, наоборот возрастают. Поскольку топливная экономичность установки прямо зависит от интенсивности солнечного излучения, приходящего на апертуру ФСК (рисунок 14в), то режим постоянной мощности практически мало отличается по

эффективности от режима постоянного приведенного расхода (рисунки 8б и 9б).

Результаты моделирования гибридной солнечной МГТУ на базе ГТД простого цикла в Июле при изотермическом способе нагружения представлены на рисунке 16.

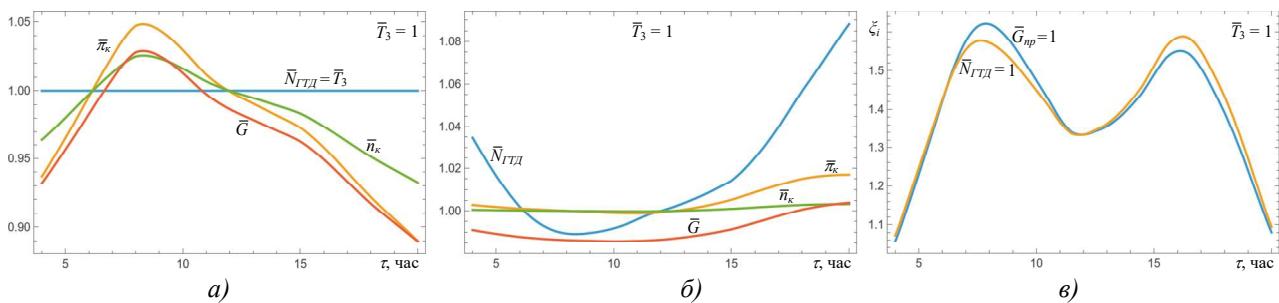


Рисунок 16 – Зависимость относительных параметров гибридной солнечной МГТУ на базе ПЦ от времени суток для Июля: а) при постоянной мощности; б) при постоянном приведенном расходе; в) сравнение эффективности этих режимов

Анализ рисунка 16 показывает, что в Июле месяце относительные параметры работы гибридной солнечной МГТУ на базе ПЦ мало отличаются от 1 (рисунки 16а и 16б) поскольку температура окружающего воздуха близка к номинальной. Поэтому режим постоянной мощности практически не отличается по эффективности от режима постоянного приведенного расхода, а сама топливная экономичность установки прямо зависит от интенсивности солнечного излучения, приходящего на апертуру ФСК (см. рисунок 16в).

Результаты моделирования гибридной солнечной МГТУ на базе ГТД простого цикла в Феврале при изотермическом способе нагружения представлены на рисунке 17.

Анализ рисунка 17 показывает, что в Феврале месяце относительные параметры работы гибридной солнечной МГТУ на базе ПЦ в режиме постоянной мощности снижаются из-за падения температуры окружающего воздуха (рисунок 17а), а в режиме постоянного приведенного расхода, наоборот возрастают (рисунок 17б). Хотя топливная экономичность установки прямо зависит от интенсивности солнечного излучения, приходящего на апертуру ФСК, но влияние постоянства максимальной температуры цикла дает прирост в эффективности в среднем на 7 % (рисунок 17в). Это хорошо заметно из сравнения рисунков 10а и 11а.

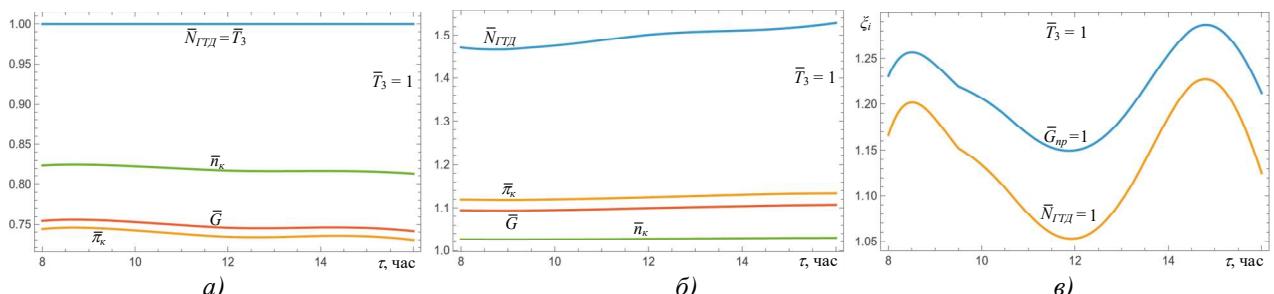


Рисунок 17 – Зависимость относительных параметров гибридной солнечной МГТУ на базе ПЦ от времени суток для Февраля: а) при постоянной мощности; б) при постоянном приведенном расходе; в) сравнение эффективности этих режимов

Введем параметр – среднемесячный коэффициент использования топлива, представляющий собой отношение мощности гибридной солнечной МГТУ к тепловой мощности, полученной от сжигания топлива, который определяется зависимостью

$$\xi_{ym} = \frac{\sum_{i=1}^{24} N_{ei}}{\sum_{i=1}^{24} Q_{fi}}, \quad (8)$$

где N_{ei} – мощность гибридной солнечной МГТУ для i -го часа, кВт;

Q_{fi} – тепловая мощность, полученная при сгорании топлива в гибридной солнечной

МГТУ для i -го часа, кВт.

Распределение среднемесячного коэффициента использования топлива по месяцам года для гибридной солнечной МГТУ на базе ПЦ и когенерационной МГТУ на базе ПЦ в режиме постоянного приведенного расхода при винтовом способе нагружения изображены на рисунке 18.

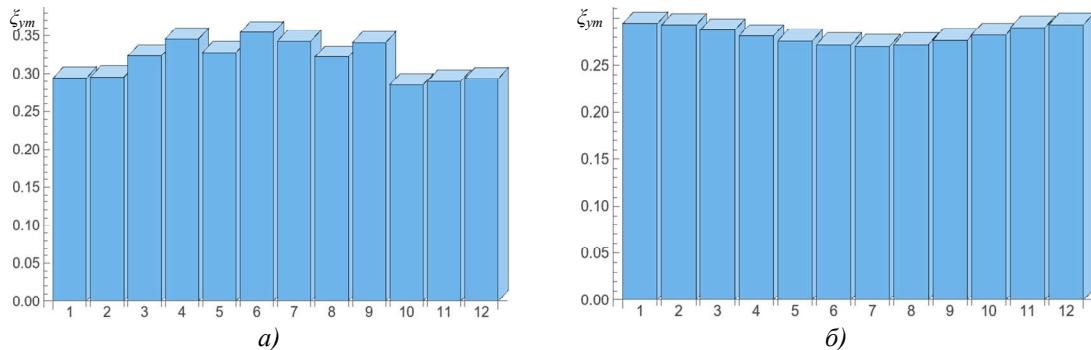


Рисунок 18 – Распределение среднемесячного коэффициента использования топлива по месяцам года:
а) для гибридной солнечной МГТУ на базе ПЦ, $A_s = 1800 \text{ м}^2$; б) для когенерационной МГТУ на базе ПЦ

Анализ рисунка 18 показывает, что включение ФСК площадью апертуры $A_s = 1800 \text{ м}^2$ в состав МГТУ на базе ПЦ позволяет повысить топливную экономичность гибридной установки с февраля по октябрь с 27,7 % до 31,8 %, т.е. на 4 %. При изотермическом способе нагружения эти цифры составят – с 27,7 % до 32,7 %, т.е. на 5,0 %. С ноября по январь приход солнечной радиации очень мал и наблюдается тот случай, когда гидравлические потери нивелируют прибавку эффективности от дополнительного подогрева циклового воздуха.

Введем параметр – среднемесячный коэффициент использования мощности, представляющий собой отношение мощности гибридной солнечной МГТУ к мощности на номинальном режиме, который определяется зависимостью

$$n_{ym} = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} \frac{N_{ei}}{N_{e0}}, \quad (9)$$

где N_{ei} – мощность гибридной солнечной МГТУ для i -го часа, кВт;
 N_{e0} – мощность на номинальном режиме, кВт.

Распределение среднемесячного коэффициента использования мощности по месяцам года для гибридной солнечной МГТУ на базе ПЦ и когенерационной МГТУ на базе ПЦ в режиме постоянного приведенного расхода при винтовом способе нагружения изображены на рисунке 19.

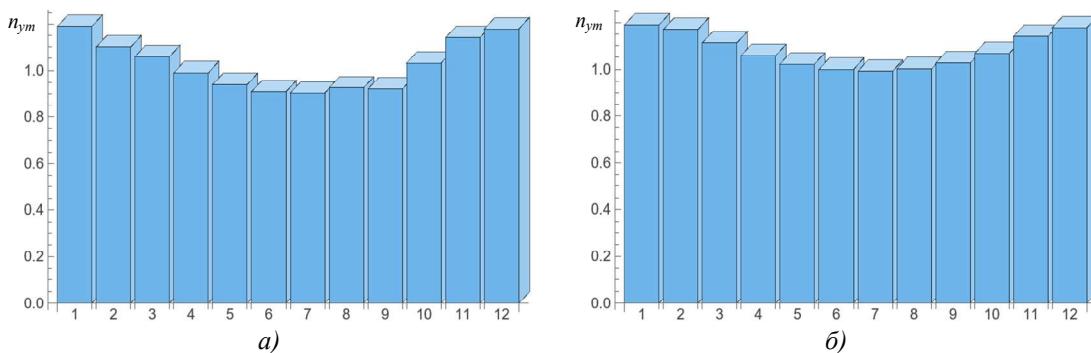


Рисунок 19 – Распределение среднемесячного коэффициента использования мощности по месяцам года:
а) для гибридной солнечной МГТУ на базе ПЦ, $A_s = 1800 \text{ м}^2$; б) для когенерационной МГТУ на базе ПЦ

Анализ рисунка 19 показывает, что включение ФСК площадью апертуры $A_s = 1800 \text{ м}^2$ в состав МГТУ на базе ПЦ при водит к снижению вырабатываемой мощности по сравнению с базовой установкой. Причем в самые жаркие месяцы наблюдаются наибольшие потери, что необходимо учитывать при выборе мощности базовой установки для локального объекта. Среднегодовые потери мощности от использования ФСК при винтовом способе регулирования составляют 5,5 %, а при изотермическом – 3 %.

Результаты моделирования гибридной солнечной МГТУ на базе ПЦ+ТКУ в Июле при винтовом способе нагружения представлены на рисунке 20.

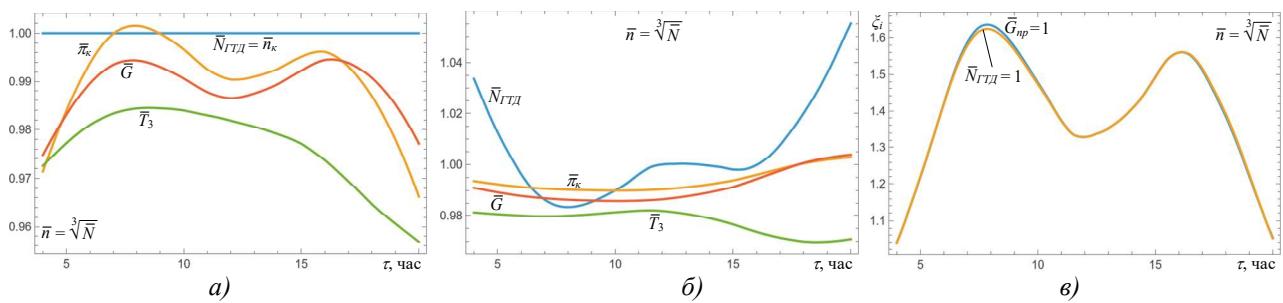


Рисунок 20 – Зависимость относительных параметров гибридной солнечной МГТУ на базе ПЦ+ТКУ от времени суток для Июля: а) при постоянной мощности; б) при постоянном приведенном расходе; в) сравнение эффективности этих режимов

Анализ рисунка 20 показывает, что в Июле месяце относительные параметры работы гибридной солнечной МГТУ на базе ПЦ мало отличаются от 1 (рисунки 20а и 20б) поскольку температура окружающего воздуха близка к номинальной. Поэтому режим постоянной мощности практически не отличается по эффективности от режима постоянного приведенного расхода, а сама топливная экономичность установки прямо зависит от интенсивности солнечного излучения, приходящего на апертуру ФСК (см. рисунок 20в).

Результаты моделирования гибридной солнечной МГТУ на базе ПЦ+ТКУ в Феврале при винтовом способе нагружения представлены на рисунке 21.

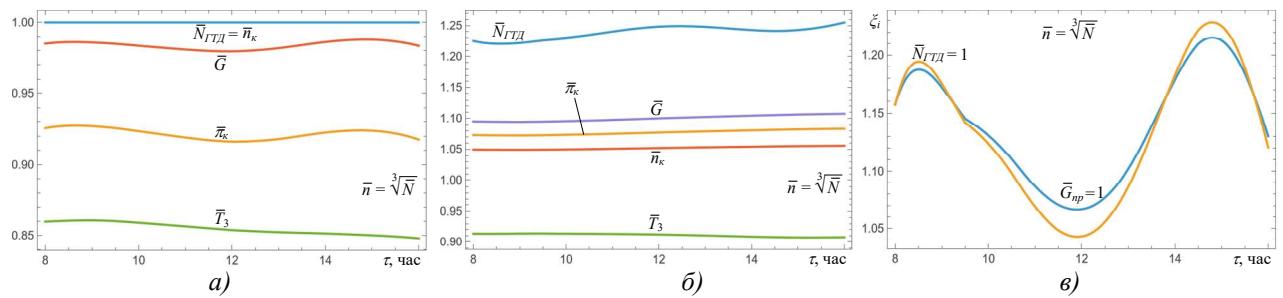


Рисунок 21 – Зависимость относительных параметров гибридной солнечной МГТУ на базе ПЦ+ТКУ от времени суток для Февраля: а) при постоянной мощности; б) при постоянном приведенном расходе; в) сравнение эффективности этих режимов

Анализ рисунка 21 показывает, что в Феврале месяце относительные параметры работы гибридной солнечной МГТУ на базе ПЦ в режиме постоянной мощности снижаются из-за падения температуры окружающего воздуха (рисунок 21а), а в режиме постоянного приведенного расхода, наоборот возрастают (рисунок 21б). Поскольку топливная экономичность установки прямо зависит от интенсивности солнечного излучения, приходящего на апертуру ФСК (см. Рисунок 21в), то режим постоянной мощности практически мало отличается по эффективности от режима постоянного приведенного расхода (см. рисунки 10б и 11б).

Результаты моделирования гибридной солнечной МГТУ на базе ПЦ+ТКУ в Июле при изотермическом способе нагружения представлены на рисунке 22.

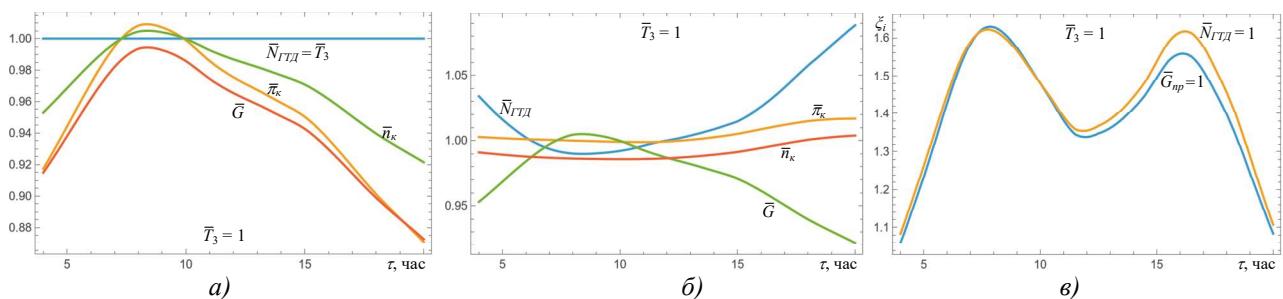


Рисунок 22 – Зависимость относительных параметров гибридной солнечной МГТУ на базе ПЦ от времени суток для Июля: а) при постоянной мощности; б) при постоянном приведенном расходе; в) сравнение эффективности этих режимов

Анализ рисунка 22 показывает, что в Июле месяце относительные параметры работы гибридной солнечной МГТУ на базе ПЦ+ТКУ мало отличаются от 1 (рисунки 22а и 22б) поскольку температура окружающего воздуха близка к номинальной. Поэтому режим

постоянной мощности практически не отличается по эффективности от режима постоянного приведенного расхода, а сама топливная экономичность установки прямо зависит от интенсивности солнечного излучения, приходящего на апертуру ФСК (рисунок 22 σ).

Результаты моделирования гибридной солнечной МГТУ на базе ПЦ+ТКУ в Феврале при изотермическом способе нагружения представлены на рисунке 23.

Анализ рисунка 23 показывает, что в Феврале месяце относительные параметры работы гибридной солнечной МГТУ на базе ПЦ в режиме постоянной мощности снижаются из-за падения температуры окружающего воздуха (рисунок 23 a), а в режиме постоянного приведенного расхода, наоборот возрастают (рисунок 23 b). Хотя топливная экономичность установки прямо зависит от интенсивности солнечного излучения, приходящего на апертуру ФСК, но влияние постоянства максимальной температуры цикла дает прирост в эффективности в среднем на 7 % (рисунок 23 c). Это хорошо заметно из сравнения рисунков 10 a и 11 a .

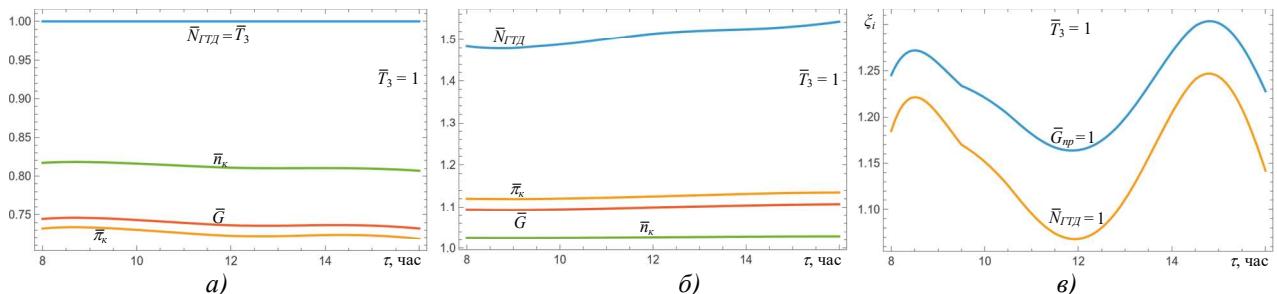


Рисунок 23 – Зависимость относительных параметров гибридной солнечной МГТУ на базе ПЦ+ТКУ от времени суток для Февраля: а) при постоянной мощности; б) при постоянном приведенном расходе; в) сравнение эффективности этих режимов

Распределение среднемесячного коэффициента использования топлива по месяцам года для гибридной солнечной МГТУ на базе ПЦ+ТКУ и когенерационной МГТУ на базе ПЦ+ТКУ в режиме постоянного приведенного расхода при изотермическом способе нагружения изображены на рисунке 24.

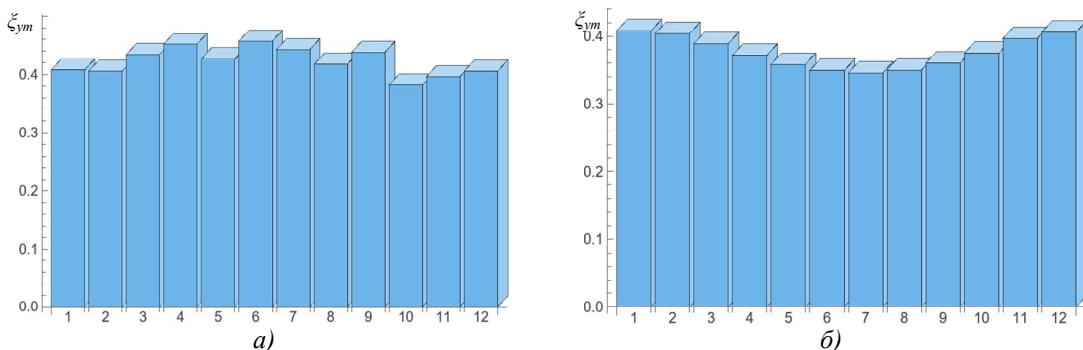


Рисунок 24 – Распределение среднемесячного коэффициента использования топлива по месяцам года:
а) для гибридной солнечной МГТУ на базе ПЦ+ТКУ, $A_s = 1800 \text{ м}^2$; б) для когенерационной МГТУ на базе ПЦ+ТКУ

Анализ рисунка 24 показывает, что включение ФСК площадью апертуры $A_s = 1800 \text{ м}^2$ в состав МГТУ на базе ПЦ+ТКУ позволяет повысить топливную экономичность гибридной установки с февраля по октябрь с 35,0 % до 42,2 %, т.е. на 7,2 %. При винтовом способе нагружения эти цифры составят – с 35,0 % до 40,9 %, т.е. на 5,9 %. С ноября по январь приход солнечной радиации очень мал и наблюдается тот случай, когда гидравлические потери нивелируют прибавку эффективности от дополнительного подогрева циклового воздуха.

Распределение среднемесячного коэффициента использования мощности по месяцам года для гибридной солнечной МГТУ на базе ПЦ+ТКУ и когенерационной МГТУ на базе ПЦ+ТКУ в режиме постоянного приведенного расхода при винтовом способе нагружения изображены на рисунке 25.

Анализ рисунка 25 показывает, что включение ФСК площадью апертуры $A_s = 1800 \text{ м}^2$ в состав МГТУ на базе ПЦ+ТКУ при водит к снижению вырабатываемой мощности по сравнению с базовой установкой. Причем в самые жаркие месяцы наблюдаются наибольшие потери, что необходимо учитывать при выборе мощности базовой установки для локального объекта.

Среднегодовые потери мощности от использования ФСК в режиме постоянного расхода при изотермическом способе регулирования составляют 3 %, при винтовом способе – 5,4 %.

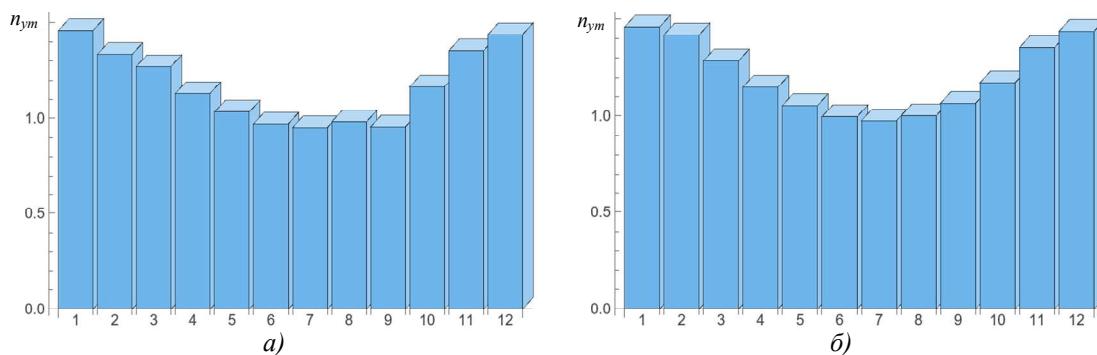


Рисунок 25 – Распределение среднемесечного коэффициента использования мощности по месяцам года:
а) для гибридной солнечной МГТУ на базе ПЗ+ТКУ, $A_s = 1800 \text{ м}^2$; б) для когенерационной МГТУ на базе ПЗ+ТКУ

Заключение

Проведенные исследования показали, что:

- в условиях Севера большие сезонные перепады температур оказывают существенное влияние на параметры работы гибридных солнечных МГТУ;
- включение ФСК в состав когенерационной МГТУ позволяет увеличить топливную экономичность на 4...7 % и снижает выработку электроэнергии на 3...5 % в год, что необходимо учитывать при подборе базовой МГТУ;
- наиболее целесообразным (если есть возможность выхода на внешние электросети) режимом работы гибридных установок является режим постоянного приведенного расхода, который обеспечивает более высокую экономичность при пониженных температурах окружающего воздуха;
- наиболее экономичной является схема гибридной солнечной МГТУ на базе ПЗ+ТКУ, однако в климатических условиях Севера, где теплоснабжение является в осенне-весенний период основой выживания наиболее целесообразной является схема на базе ПЗ, которая имеет значительно более высокий теплотехнический КПД (см. таблицу 2).

Перспективным способом дальнейшего повышения эффективности гибридной солнечной МГТУ является использование охладителя газов (ОГ1 или ОГ2) для интегрирования установки органического цикла Ренкина.

Исследование выполнено по госбюджетной теме ИПТС «Создание научных основ разработки гибких комбинированных установок с интегрированными возобновляемыми источниками энергии и использованием местных ресурсов холода (FFMM-2024-0018)» (№ госрегистрации 124020100121-6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. International Energy Agency, 2011, “Renewable Energy Technologies: Solar Energy Perspectives”, OECD/IEA Publications, Paris.
2. Fernández-García A., Zarza E., Valenzuela L. and Pérez M., 2010, “Parabolic-Trough Solar Collectors and their Applications”, Renew. Sust. Energ. Rev., 14(7), pp. 1695-1721.
3. Müller-Steinhagen H. and Trieb F., 2004, “Concentrating Solar Power: a Review of the Technology”, Ingenia, 18, pp. 43-50.
4. Odeh, S. D., Morrison, G. L., and Behnia, M., 1998, “Modelling of parabolic trough direct steam generation solar collectors,” Sol. Energy, 62(6), pp. 395-406.
5. Utamura, M., and Tamaura, Y., 2006, “A Solar Gas Turbine Cycle With Super-Critical Carbon Dioxide as a Working Fluid,” Vol. 4 Cycle Innov. Electr. Power; Ind. Cogener. Manuf. Mater. Metall., 2006, pp. 329-335.
6. Quero, M., Korzynietz, R., Ebert, M., Jiménez, a. a., del Río, a., and Brioso, J. a., 2014, “Solugas – Operation Experience of the First Solar Hybrid Gas Turbine System at MW Scale,” Energy Procedia, 49, pp. 1820–1830.
7. EU Commission, 2005, SOLGATE: Solar Hybrid Gas Turbine Electric Power System, EU Commission, Directorate-General for Research and Innovation, Luxembourg.
8. Атлас ресурсов солнечной энергии на территории России / О.С. Попель, С.Е. Фрид, Ю.Г. Коломиец и др. М.: ОИВТ РАН, 2010.
9. Создание научных основ разработки гибких мультигенерационных установок с использованием возобновляемых источников энергии и местных ресурсов холода в условиях климатических изменений: отчет о НИР / ФГБНУ «Институт природно-технических систем»; рук. А. В. Долголонян; исполн.: А.М. Олейников, В.А. Сафонов, В.Т. Матвеенко и др. Севастополь, 2023. 138 с. Библиог.: с. 118. № ГР 224020900217-7.
10. Матвеенко В.Т. Глубокая утилизация теплоты в газотурбинных двигателях с турбиной перерасширения / В.Т. Матвеенко // Промышленная теплотехника. – 1997. – Т. 19. – № 4-5. – С. 81-85.
11. Matviinko V. Variable regimes operation of cogenerative gas -turbine engines with overexpansion turbine/ V.Matviinko, V. Ocheretianyi// Proceccoligs of ASME Turbo Expo 2010: Power of Land, Sea and Air GT2010, June 14-

18, 2010, Glasgow, UK, GT2010-22029.

12. Matviienko V. Gas Turbine Plant with Overexpansion Turbine and Heat Regeneration in the Ship Propulsion Complex / V. Matviienko, O. Andriets, V. Ochretiany // Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: June 16-20, 2014, Dusseldorf, Germany.

13. Matviienko V. Working Process Control in a Ship Gas Turbine Engine of Complex Cycle / V/ Matviienko, V. Ocheretiany // Procecoling of ASME Turbo Expo 2016: June 13-17, 2016, Seoul, South Korea.

14. Барков, В.В. Выбор параметров и обоснование конструктивной схемы малогабаритной газотурбинной установки с независимым соотношением частот вращения роторов турбины и компрессора: специальность 05.04.12 «Турбомашины и комбинированные турбоустановки»: автореферат докторской диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Барков Виктор Валентинович. Санкт-Петербург, 2017. 22 с.

15. Долголонян А.В., Матвеенко В.Т., Клименко А.Г. Микрогазотурбинные установки с повышенными термодинамическими характеристиками, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 2 часть 1, С. 117-125. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.013

16. Dudley, V E, Kolb, G J, Mahoney, A R, Mancini, T R, Matthews, C W, Sloan, M, and Kearney, D. Test results: SEGS LS-2 solar collector. United States: N. p., 1994. Web. doi:10.2172/70756.

17. Forristall, R. Heat Transfer Analysis and Modeling of a Parabolic Trough Solar Receiver Implemented in Engineering Equation Solver. United States: N. p., 2003. Web. doi:10.2172/15004820.

18. Научно-прикладной справочник по климату СССР, вып. 24, Якутская АССР, кн. 1 / под общ. ред. Н.В. Кобышевой. – Л.: Гидрометеоиздат, 1989. – 608 с.

19. Даффи Дж.А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии / Дж.А. Даффи, У.А. Бекман. – М.: Мир, 1977. – 420 с.

20. Долголонян А.В. Термодинамические характеристики сложных циклов микрогазотурбинных двигателей с интегрированным фокусирующим солнечным коллектором / А.В. Долголонян, В.Т. Матвеенко, И.Н. Стаценко // Известия РАН. Энергетика. 2021. № 2. С. 1-23. – DOI: 10.31857/S0002331021020084.

21. Вукалович М.П. Термодинамика / М.П. Вукалович, И.И. Новиков. – М.: Машиностроение, 1972. – 672 с.

22. Переходные процессы в газотурбинных установках / Под ред. д-ра техн. наук, проф. И. В. Котляра. Л.: Машиностроение. [Ленингр. отд-ние], 1973. 254 с.

23. Долголонян А.В. Термодинамические характеристики сложных циклов микрогазотурбинных двигателей с интегрированным фокусирующим солнечным коллектором / А.В. Долголонян, В.Т. Матвеенко, И.Н. Стаценко // Известия РАН. Энергетика. 2021. № 2. С. 128-150. – DOI: 10.31857/S0002331021020084

24. A Novel Concept for Reducing Water Usage and Increasing Efficiency in Power Generation. Final Report U.S. Department of Energy. National Energy Technology Laboratory. Pittsburgh, PA. March 2004 DOE Award No.: DE-FG26-02NT41544.

25. Ревзин Б.С. Газоперекачивающие агрегаты с газотурбинным приводом. Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2002. 269 с.

Долголонян Андрей Вартазарович
ФГБНУ «Институт природно-
технических систем»,
г. Севастополь
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
заведующий лабораторией, доцент
299011, Севастополь, Гоголя, 14
e-mail: dologlonyan@mail.ru

Матвеенко Валерий Тимофеевич
ФГБНУ «Институт природно-
технических систем»,
г. Севастополь
доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
профессор
299011, Севастополь, Гоголя, 14
e-mail: mvt3900@mail.ru

Клименко Александр Георгиевич
ФГБНУ «Институт природно-
технических систем», г.
Севастополь
ведущий инженер-исследователь
299011, Севастополь, Гоголя, 14
e-mail: kag195877@gmail.com

DOLOGLONYAN A.V., MATVEENKO V.T., KLIMENKO A.G.

THERMODYNAMIC CHARACTERISTICS OF HYBRID MICRO GAS TURBINE PLANTS WITH AN INTEGRATED FOCUSING SOLAR COLLECTOR IN NORTHERN CONDITIONS

Abstract. The article examines the use of a concentrating (parabolic trough) solar collector (CSC) to improve the efficiency of micro gas turbine engines (MGTE) of various configurations. Hybrid solar micro gas turbine plants based on a simple-cycle (SC) MGTE and a SC with a turbocharger utilizer (TCU) for northern climatic conditions are investigated. It is determined that the most economical MGTE configuration for integrating a CSC is a combination of a simple cycle with a TCU, since it allows the fullest realization of the CSC potential. It is established that the combination of a SC MGTE with a TCU with an integrated CSC allows increasing the average annual fuel utilization factor of such plants in northern conditions by 6...7%, while maintaining cogeneration capabilities.

Keywords: micro-gas turbine plant, microturbine, concentrating solar collector, turbocharger utilizer.

BIBLIOGRAPHY

1. International Energy Agency, 2011, “Renewable Energy Technologies: Solar Energy Perspectives”, OECD/IEA Publications, Paris.
2. Fernández-García A., Zarza E., Valenzuela L. and Pérez M., 2010, “Parabolic-Trough Solar Collectors and their Applications”, Renew. Sust. Energ. Rev., 14(7), pp. 1695-1721.
3. Müller-Steinhagen H. and Trieb F., 2004, “Concentrating Solar Power: a Review of the Technology”, Ingenia, 18, pp. 43-50.

4. Odeh, S. D., Morrison, G. L., and Behnia, M., 1998, "Modelling of parabolic trough direct steam generation solar collectors," Sol. Energy, 62(6), pp. 395-406.
5. Utamura, M., and Tamaura, Y., 2006, "A Solar Gas Turbine Cycle With Super-Critical Carbon Dioxide as a Working Fluid," Vol. 4 Cycle Innov. Electr. Power; Ind. Cogener. Manuf. Mater. Metall., 2006, pp. 329-335.
6. Quero, M., Korzynietz, R., Ebert, M., Jiménez, a. a., del Rio, a., and Brios, J. a., 2014, "Solugas – Operation Experience of the First Solar Hybrid Gas Turbine System at MW Scale," Energy Procedia, 49, pp. 1820–1830.
7. EU Commission, 2005, SOLGATE: Solar Hybrid Gas Turbine Electric Power System, EU Commission, Directorate-General for Research and Innovation, Luxembourg.
8. Atlas resursov solnechnoj energii na territorii Rossii / O.S. Popel, S.E. Frid, YU.G. Kolomiec i dr. M.: OIVT RAN, 2010.
9. Sozdanie nauchnyh osnov razrabotki gibkih multigeneracionnyh ustanovok s ispolzovaniem vozobnovlyaemyh istochnikov energii i mestnyh resursov holoda v usloviyah klimaticheskikh izmenenij: otchet o NIR / FGBNU «Institut prirodno-tehnicheskikh sistem»; ruk. A. V. Dologlonyan; ispoln.: A.M. Olejnikov, V.A. Safonov, V.T. Matveenko i dr. Sevastopol, 2023. 138 s. Bibliogr.: s. 118. № GR 224020900217-7.
10. Matveenko V.T. Glubokaya utilizaciya teploty v gazoturbinnyyh dvigateley s turbinoj pererasshireniya / V.T. Matveenko // Promyshlennaya teplotekhnika. – 1997. – T. 19. – № 4-5. – S. 81-85.
11. Matviinko V. Variable regimes operation of cogenerative gas -turbine engines with overexpansion turbine/ V.Matviinko, V. Ocheretianiy// Procecoligs of ASME Turbo Expo 2010: Power of Land, Sea and Air GT2010, June 14-18, 2010, Glasgow, UK, GT2010-22029.
12. Matvienko V. Gas Turbine Plant with Overexpansion Turbine and Heat Regeneration in the Ship Propulsion Complex / V. Matvienko, O. Andriets, V. Ochretiany // Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: June 16-20, 2014, Dusseldorf, Germany.
13. Matvienko V. Working Process Control in a Ship Gas Turbine Engine of Complex Cycle / V/ Matvienko, V. Ocheretianyi // Procecoling of ASME Turbo Expo 2016: June 13-17, 2016, Seoul, South Korea.
14. Barskov, V.V. Vybor parametrov i obosnovanie konstruktivnoj skhemy malogabaritnoj gazoturbinnoy ustanovki s nezavisimym sootnosheniem chasot vrashcheniya rotorov turbiny i kompressora: specialnost 05.04.12 «Turbomashiny i kombinirovannye turboustanovki»: avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk / Barskov Viktor Valentinovich. Sankt-Peterburg, 2017. 22 s.
15. Dologlonyan A.V., Matveenko V.T., Klimenko A.G. Mikrogazoturbinnye ustanovki s povyshennymi termodinamicheskimi harakteristikami, Morskie intellektualnye tekhnologii. 2024. № 2 chast 1, S. 117-125. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.013
16. Dudley, V E, Kolb, G J, Mahoney, A R, Mancini, T R, Matthews, C W, Sloan, M, and Kearney, D. Test results: SEGS LS-2 solar collector. United States: N. p., 1994. Web. doi:10.2172/70756.
17. Forristall, R. Heat Transfer Analysis and Modeling of a Parabolic Trough Solar Receiver Implemented in Engineering Equation Solver. United States: N. p., 2003. Web. doi:10.2172/15004820.
18. Nauchno-prikladnoj spravochnik po klimatu SSSR, vyp. 24, YAkutskaya ASSR, kn. 1 / pod obshch. red. N.V. Kobyshevoj. – L.: Gidrometeoizdat, 1989. – 608 s.
19. Daffi Dzh.A. Teplovye processy s ispolzovaniem solnechnoj energii / Dzh.A. Dafii, U.A. Bekman. – M.: Mir, 1977. – 420 s.
20. Dologlonyan A.V. Termodinamicheskie harakteristiki slozhnyh ciklov mikrogazoturbinnyh dvigatelej c integrirovannym fokusiruyushchim solnechnym kollektorom / A.V. Dologlonyan, V.T. Matveenko, I.N. Stacenko // Izvestiya RAN. Energetika. 2021. № 2. S. 1-23. – DOI: 10.31857/S0002331021020084.
21. Vukalovich M.P. Termodinamika / M.P. Vukalovich, I.I. Novikov. – M.: Mashinostroenie, 1972. – 672 s.
22. Perekhodnye processy v gazoturbinnyyh ustanovkah / Pod red. d-ra tekhn. nauk, prof. I. V. Kotlyara. L.: Mashinostroenie. [Leningr. otd-nie], 1973. 254 s.
23. Dologlonyan A.V. Termodinamicheskie harakteristiki slozhnyh ciklov mikrogazoturbinnyh dvigatelej c integrirovannym fokusiruyushchim solnechnym kollektorom / A.V. Dologlonyan, V.T. Matveenko, I.N. Stacenko // Izvestiya RAN. Energetika. 2021. № 2. S. 128-150. – DOI: 10.31857/S0002331021020084
24. A Novel Concept for Reducing Water Usage and Increasing Efficiency in Power Generation. Final Report U.S. Department of Energy. National Energy Technology Laboratory. Pittsburgh, PA. March 2004 DOE Award No.: DE-FG26-02NT41544.
25. Revzin B.S. Gazoperekachivayushchie agregaty s gazoturbinnym privodom. Ekaterinburg, UGTU-UPI, 2002. 269 s.

Dologlonyan Andrey Vartazarovich
Institute of Nature and Technical Systems, Sevastopol
Candidate of Technical Sciences,
Leading Researcher, Chief of Laboratory, Assistant Professor
299011, Sevastopol, Gogol St., 14
e-mail: dologlonyan@mail.ru

Matveenko Valeriy Timofeevich
Doctor of Technical Sciences, Chief Scientist, Professor,
299011, Sevastopol, Gogol St., 14
e-mail: mvt3900@mail.ru

Klimenko Alexander Georgievich
Institute of Nature and Technical Systems, Sevastopol
Lead Research Engineer,
299011, Sevastopol, Gogol St., 14
e-mail: kag195877@gmail.com

ПАХАЛЮК А.В., СТАДНИК Т.В.

КРАТКИЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОЛИРОВАНИЯ ДЛИННОМЕРНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ АЛЮМИНИЕВЫХ ЗАГОТОВОВОК

Аннотация. Статья посвящена комплексному обзору современных методов полирования длинномерных цилиндрических алюминиевых заготовок. Рассмотрены основные подходы: ленточное полирование, роботизированные системы, электрохимическая обработка, химико-механическая полировка и автоматизированные системы. Проведен сравнительный анализ достоинств и недостатков каждого метода с особым вниманием к применению для алюминиевых сплавов. Особое внимание уделено ленточному полированию как наиболее эффективному методу для обработки длинномерных цилиндрических заготовок из алюминия. Показано, что ленточное полирование обеспечивает оптимальное сочетание производительности, качества поверхности и экономической эффективности при обработке алюминиевых изделий.

Ключевые слова: ленточное полирование, алюминиевые сплавы, цилиндрические заготовки, абразивная обработка, качество поверхности.

1. Введение

Расширение ассортимента деталей из алюминиевых сплавов и повышение требований к их качеству вызвали необходимость применения такого нехарактерного для них метода обработки как полирование. Алюминиевые сплавы широко применяются в авиационной, автомобильной и пищевой промышленности, где требования к качеству поверхности особенно высоки. Длинномерные цилиндрические заготовки из алюминия используются в конструкциях трубопроводов, элементах каркасов, оптических системах и других ответственных узлах. Современные исследования показывают, что полированная поверхность алюминиевых изделий меньше задерживает на себе грязь, реагенты и пыль, что значительно увеличивает срок службы изделий. Кроме того, повышаются отражательные способности сплавов алюминия после различных видов полирования, что критически важно для оптических и декоративных применений [1].

Традиционные методы обработки, такие как токарная обработка или фрезерование, не всегда обеспечивают требуемое качество поверхности $R_a < 0,1$ мкм, необходимое для современных технических применений. Алюминиевые сплавы обладают особенностями обработки: склонность к засаливанию абразивного инструмента, низкая теплопроводность, что может приводить к деформациям при неправильном выборе режимов обработки [2]. Одним из методов абразивной обработки, позволяющим обрабатывать сложные фасонные детали с высоким качеством и механизирующим ручной труд, является ленточное полирование. Данный метод показывает особую эффективность при обработке длинномерных цилиндрических заготовок благодаря возможности непрерывного контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью [3].

2 Основные методы полирования алюминиевых заготовок

2.1 Ленточное полирование

Ленточное полирование представляет собой процесс обработки поверхности с использованием бесконечной абразивной ленты, движущейся между роликами. Современные автоматические машины для полировки алюминиевых профилей используют вращающиеся щетки или абразивные ленты для механической обработки поверхности, создавая однородную текстуру. Для алюминиевых сплавов применяются специальные ленты с зернистостью от P400 до P2000, что позволяет получить шероховатость поверхности $R_a = 0,02-0,1$ мкм [4, 5].

Достоинства метода:

- высокая производительность и автоматизированная работа с быстрой скоростью обработки;
- возможность обработки длинномерных деталей без ограничений по длине;
- постоянство скорости резания и хороший отвод тепла, особенно при мокром полировании;
- низкая стоимость обработки при высокой эффективности [4].

Недостатки:

- ограниченная точность при обработке резких переходов;
- необходимость частой смены лент при высоких требованиях к качеству;
- при сухом способе возможен перегрев и появление дефектов поверхности.

2.2 Роботизированные методы полирования

Современные роботизированные системы с ЧПУ позволяют программировать сложные траектории движения инструмента относительно заготовки. Для алюминиевых изделий применяется многоэтапный подход: черновая обработка, сухая обработка, смазка и окончательная обработка. Используются абразивы с различной зернистостью - от 40-80 для грубой обработки до 1000 и выше для получения зеркального блеска [6].

Достоинства:

- высокая гибкость и возможность обработки сложных поверхностей;
- стабильность параметров обработки благодаря программному управлению;
- возможность интеграции в автоматизированные производственные линии;
- точный контроль давления и скорости обработки, что критично для мягкого алюминия.

Недостатки:

- высокие капитальные затраты на оборудование;
- сложность программирования траекторий;
- необходимость квалифицированного персонала для настройки и обслуживания.

2.3 Электрохимическое полирование

Электрохимическое полирование основано на анодном растворении поверхностного слоя металла в электролите. Метод широко применяется для алюминиевого проката, включая швеллеры и профили сложного сечения. Процесс включает бриталь-процесс, альзак-процесс и баттель-процесс с использованием электролитических растворов на основе фосфорной кислоты [7].

Достоинства:

- отсутствие механических напряжений в поверхностном слое;
- возможность обработки сложных внутренних поверхностей;
- высокое качество поверхности $R_a < 0,05$ мкм;
- формирование защитной оксидной пленки на поверхности.

Недостатки:

- высокая стоимость оборудования и реагентов;
- экологические проблемы утилизации электролитов;
- ограниченность применения для сплавов с неоднородной структурой;
- необходимость предварительной механической обработки для удаления крупных дефектов.

2.4 Механическая полировка с использованием абразивных материалов

Современные методы механической полировки алюминия включают последовательное применение абразивных материалов различной зернистости. Процесс начинается с грубой шлифовки (P400-P600), затем переходит к тонкой шлифовке (P800-P1500) и завершается полировкой с использованием войлочных кругов и специальных паст [1, 8].

Достоинства:

- полный контроль над процессом обработки;
- возможность достижения зеркального качества поверхности;
- относительно низкие капитальные затраты;
- универсальность применения для различных геометрий.

Недостатки:

- низкая производительность при ручной обработке;
- высокие требования к квалификации операторов;
- неравномерность качества при ручном выполнении.

2.5 Химическая полировка

Химическая полировка алюминиевых изделий проводится как в кислых, так и в щелочных растворах. Метод обеспечивает равномерное удаление поверхностного слоя без механического воздействия [9].

Достоинства:

- отсутствие механических воздействий на поверхность;
- возможность обработки сложных профилей одновременно;
- равномерность обработки по всей поверхности.

Недостатки:

- сложность контроля процесса;
- экологические ограничения;
- необходимость специальной подготовки поверхности.

3 Сравнительный анализ методов

Для длинномерных цилиндрических алюминиевых заготовок наиболее важными критериями выбора метода полирования являются: производительность, качество поверхности, экономическая эффективность и возможность автоматизации процесса. Ленточное полирование демонстрирует оптимальное сочетание всех указанных критериев. В отличие от других методов, ленточное полирование обеспечивает [4]:

- высокую производительность – автоматические машины обеспечивают быструю скорость обработки при низкой стоимости процесса [4];
- стабильное качество – механическая обработка абразивными лентами создает однородную текстуру поверхности [4];
- экономическую эффективность – низкие эксплуатационные затраты по сравнению с химическими методами;
- экологическую безопасность – отсутствие химических реагентов при сухой обработке.

Особое преимущество ленточного полирования для алюминиевых сплавов заключается в возможности эффективного теплоотвода, что критично для предотвращения налипания материала на абразивный инструмент. При использовании низких скоростей (2500 об/мин) и правильном выборе давления удается избежать перегрева мягкого алюминия [1, 2, 10–13]. Современные системы автоматической полировки алюминиевых профилей позволяют удалять линии штамповки, выдавленные линии и другие дефекты поверхности с высокой эффективностью. Широкий диапазон применения таких систем делает их особенно привлекательными для массового производства [4].

4 Современные тенденции развития

Анализ современных технологий показывает активное развитие автоматизированных систем полирования алюминиевых изделий. Использование программного управления позволяет в реальном времени корректировать параметры обработки, что особенно важно для алюминиевых сплавов с их склонностью к налипанию на инструмент [4].

Перспективным направлением является совершенствование технологий непрерывного процесса обработки алюминиевых сплавов с одновременной деформацией металла, что открывает новые возможности для интеграции процессов полирования в общую технологическую цепочку [14].

Для различных применений разрабатываются специализированные методы: для алюминиевых экструзионных головок применяется электролитическая полировка, электрохимическая полировка, притирка и хонингование. Каждый метод оптимизирован под конкретные требования к качеству поверхности и геометрии изделий.

5. Заключение

Проведенный анализ методов полирования длинномерных цилиндрических алюминиевых заготовок показал, что ленточное полирование является наиболее эффективным решением для данного класса задач. Метод обеспечивает оптимальное сочетание производительности, качества поверхности и экономической эффективности.

Ключевые преимущества ленточного полирования для алюминиевых заготовок

включают: высокую производительность при автоматизированной работе, возможность обработки длинномерных деталей, стабильное качество поверхности $R_a = 0,02\text{--}0,1$ мкм, эффективный теплоотвод и низкую стоимость обработки. Развитие автоматизированных систем управления открывает новые возможности для дальнейшего совершенствования технологии ленточного полирования.

Для промышленного применения рекомендуется использование автоматических машин для полирования алюминиевых профилей с программным управлением параметрами процесса, что обеспечивает максимальное качество обработки при минимальных затратах. Альтернативные методы, такие как электрохимическое и химическое полирование, целесообразно применять для специальных случаев, когда требуется обработка сложных внутренних поверхностей или достижение особо высокого качества поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Строилов А.М. Сравнительный анализ отражательной способности сплава алюминия Д16 после химического и электрохимического полирования // Научно-технический вестник Поволжья. 2022. №10. С. 45-48.
2. Сергеева А.М. О совмещенной технологии непрерывного литья алюминиевых сплавов с одновременной деформацией металла // Металлург. 2018. №5. С. 18-23.
3. Автоматическая машина для полировки алюминиевого профиля // Brightstar Aluminum Machinery. 2024. URL: <https://www.brightstaralu.com/ru/product/automatic-aluminum-profile-polishing-machine/> (дата обращения: 29.08.2025).
4. Освоение полировки алюминиевых экструзионных головок: советы, техники и преимущества // ProLean Tech. 2024. URL: <https://proleantech.com/ru/mastering-aluminum-extrusion-die-polishing-tips-techniques-and-benefits/> (дата обращения: 29.08.2025).
5. Швеллер алюминиевый: способы электрохимической полировки // Цветной прокат. 2024. URL: <http://cvetprokat.com.ua/alyuminivj/shveller-alyuminievuj-sposoby-elektrioximicheskoy-polirovki/> (дата обращения: 29.08.2025).
6. Фундаментальные исследования и последние достижения в области литья, деформации, термической обработки и защиты от коррозии алюминиевых сплавов. 2015 // Сборник материалов конференции ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ. URL: <https://www.spsl.nsc.ru/FullText/konfe/BCBSM-2015%D1%84%D0%BB%D0%BA.pdf> (дата обращения: 29.08.2025).
7. Как полировать алюминий: полное руководство // ETCN. 2023. URL: <https://china-maching.com/ru/как-полировать-алюминий-конечное-рук/> (дата обращения: 29.08.2025).
8. Полировка алюминия. Как и чем? Один из многих способов // G-Tool. 2023. URL: <https://www.blog.gtool.ru/testy/polirovka-alyuminiya-kak-i-chem-odin-iz-mnogikh-sposobov/> (дата обращения: 29.08.2025).
9. Строилов А.М., Петров И.В. Процесс химического полирования алюминиевых сплавов в кислых и щелочных растворах // Металлообработка. 2022. №8. С. 12-16.
10. Технические характеристики полировки алюминия по сравнению с другими металлами: анализ методов, температуры и параметров обработки // China Machining. 2023. С. 23-29.
11. Братан С.М. Моделирование влияния относительных колебаний инструмента и заготовки на съем материала при внутреннем шлифовании/ С.М. Братан, А.С. Часовитина //Наукоемкие технологии в машиностроении. –2022. – № 9 (135) – С. 3-9. – DOI: 10.30987/2223-4608-2022-9-3-9.
12. Bratan S., Ságová Z., Sága M., Yakimovich B., Kuric I. New Calculation Methodology of the Operations Number of Cold Rolling Rolls Fine Grinding/ Applied Sciences (Switzerland), 2023, 13(6), 3484. – <https://doi.org/10.3390/app13063484>.
13. Братан С.М. Моделирование взаимосвязей между входными факторами и выходными показателями процесса внутреннего шлифования с учетом взаимных колебаний инструмента и заготовки/ С.М. Братан, А.С. Часовитина // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 1. – С. 57-70. – DOI 10.17212/1994-6309-2023-25.1-57-70.
14. Технологии шлифовки и полировки трубы из нержавеющей стали // YouTube. 2024. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=OPHzuvxUIYs> (дата обращения: 29.08.2025).

Пахалик Андрей Владимирович
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный
университет»,
аспирант,
ул. Университетская 33, г. Севастополь, 299053
Тел. +7 978 7875150
E-mail: for_3d@mail.ru

Стадник Татьяна Валериевна
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный
университет»,
канд. техн. наук, доцент,
ул. Университетская 33, г. Севастополь, 299053
Тел. +7 978 5143272
E-mail: tvstadnik@mail.sevsu.ru

A BRIEF ANALYSIS OF POLISHING METHODS FOR LONG CYLINDRICAL ALUMINUM BLANKS

Abstract. The article is devoted to a comprehensive review of modern methods for polishing long cylindrical aluminum blanks. The main approaches are considered: belt polishing, robotic systems, electrochemical processing, chemical-mechanical polishing and automated systems. A comparative analysis of the advantages and disadvantages of each method is carried out with special attention to the application for aluminum alloys. Particular attention is paid to belt polishing as the most effective method for long cylindrical aluminum blanks processing. It is shown that belt polishing provides an optimal combination of productivity, surface quality and cost-effectiveness in the processing of aluminum products.

Keywords: graphene oxide, UHMWPE, low-pressure plasma, total hip replacement (THR), wear resistance, coefficient of friction.

BIBLIOGRAPHY

1. Stroilov A.M. Sravnitelnyy analiz otrazhatelnoy sposobnosti splava alyuminiya D16 posle khimicheskogo i elektrokhimicheskogo polirovaniya // Nauchno-tehnicheskiy vestnik Povelzhyia. 2022. №10. S. 45-48.
2. Polirovka alyuminiya. Kak i chem? Odin iz mnogikh sposobov // G-Tool. 2023. URL: <https://www.blog.gtool.ru/testy/polirovka-alyuminiya-kak-i-chem-odin-iz-mnogikh-sposobov/> (data obrashcheniya: 29.08.2025).
3. Stroilov A.M., Petrov I.V. Protsess khimicheskogo polirovaniya alyuminiyevykh splavov v kislykh i shchelochnykh rastvorakh // Metalloobrabotka. 2022. №8. S. 12-16.
4. Osvojeniye polirovki alyuminiyevykh ekstruzionnykh golovok: sovety, tekhniki i preimushchestva // ProLean Tech. 2024. URL: <https://proleantech.com/ru/mastering-aluminum-extrusion-die-polishing-tips-techniques-and-benefits/> (data obrashcheniya: 29.08.2025).
5. Kak polirovat alyuminii: polnoye rukovodstvo // ETCN. 2023. URL: <https://china-maching.com/ru/kak-polirovat-alyuminii-konechnoye-ruk/> (data obrashcheniya: 29.08.2025).
6. Pankov L.A., Kostin N.V. Lentochnoye shlifovaniye vysokoprochnykh materialov. M.: Mashinostroyeniye, 2020. 208 s.
7. Avtomaticheskaya mashina dlya polirovki alyuminiyevogo profilya // Brightstar Aluminium Machinery. 2024. URL: <https://www.brightstaralu.com/ru/product/automatic-aluminum-profile-polishing-machine/> (data obrashcheniya: 29.08.2025).
8. Syreyshchikova N.V. i dr. Ploskoye lentochnoye shlifovaniye metallov razlichnoy obrabatyvayemosti: metodicheskiye rekomendatsii. Chelyabinsk: UralNIIASH, 2021. 48 s.
9. Tekhnicheskiye kharakteristiki polirovki alyuminiya po sravneniyu s drugimi metallami: analiz metodov, temperatury i parametrov obrabotki // China Machining. 2023. S. 23-29.
10. Shveller alyuminiyevyy: sposoby elektrokhimicheskoy polirovki // Tsvetnoy prokat. 2024. URL: <http://cvetprokat.com.ua/alyuminii/shveller-alyuminiyevyi-sposoby-elektrokhimicheskoy-polirovki/> (data obrashcheniya: 29.08.2025).
11. Bratan S.M. Modelirovaniye vliyaniya otnositelnykh vibratsiy instrumenta i zagotovki na s"yem materiala pri vnutrennem shlifovanii/ S.M. Bratan, A.S. Chasovitina // Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyenii. –2022. – № 9 (135) – S. 3-9. – DOI: 10.30987/2223-4608-2022-9-3-9.
12. Bratan S., Ságová Z., Sága M., Yakimovich B., Kuric I. New Calculation Methodology of the Operations Number of Cold Rolling Rolls Fine Grinding/ Applied Sciences (Switzerland), 2023, 13(6), 3484. – <https://doi.org/10.3390/app13063484>.
13. Bratan S.M. Modelirovaniye vzaimosvyazey mezhdu vkhodnymi faktorami i vykhodnymi pokazatelyami protsesssa vnutrennego shlifovaniya s uchetom vzaimnykh kolebanii instrumenta i zagotovki/ S.M. Bratan, A.S. Chasovitina // Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovaniye, instrumenty). – 2023. – T. 25, № 1. – S. 57-70. – DOI 10.17212/1994-6309-2023-25.1-57-70.
14. Tekhnologii shlifovki i polirovki truby iz nerzhaveyushchey stali // YouTube. 2024. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=OPHzuvxUIYs> (data obrashcheniya: 29.08.2025).

Pakhaliuk Andrey Vladimirovich

FSAEI HE “Sevastopol State University”,
postgraduate student,
Universitetskaya Str. 33, Sevastopol, 299053
Phone: +7 978 7875150
E-mail: for_3d@mail.ru

Stadnik Tatyana Valerievna

FSAEI HE “Sevastopol State University”,
Ph.D., Associate Professor,
Universitetskaya Str. 33, Sevastopol, 299053
Phone: +7 978 5143272
E-mail: tvstadnik@mail.sevsu.ru

ГОДЖАЕВ З.А., ШЕХОВЦОВ В.В., ПОТАПОВ П.В., КЛЕМЕНТЬЕВ Е.В.,
ДОЛОТОВ А.А., ЕВСЕЕВА А.А.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УРОВНЯ ШУМА В САЛОНЕ СПЕЦИАЛЬНОГО МИКРОАВТОБУСА

Аннотация. Авторами выполнен анализ источников, формирующих поля внутреннего шума в салоне и в кабине водителя микроавтобусов «Скорой медицинской помощи» – агрегатов двигателя, трансмиссии, ходовой системы и подвески. Выполнен ряд экспериментальных исследований общего уровня внутреннего шума и его спектральных составляющих в салоне – на месте кушетки пациента, на месте врача, и в кабине водителя во время движения по маршруту транспортировки пациентов. Исследования выполнены для специальных машин на базе микроавтобусов Ford Transit и Mercedes-Benz Sprinter. Результаты исследований свидетельствуют о существенном превышении допустимого санитарными нормами уровня шума в 60 дБА. Общий уровень шума в ряде случаев превышает 70 дБА, а уровни спектральных составляющих шума особенно высоки в области частот от 0 до 400 Гц третьоктавного спектра, причем в диапазоне частот от 16 до 25 Гц достигают значений в 90–95 дБА. Следовательно, актуальными являются научные работы, направленные на выявление реальной шумовой картины в салоне специального микроавтобуса для перевозки больных, и поиск путей снижения общего уровня внутреннего шума и его спектральных составляющих.

Ключевые слова: микроавтобус «Скорая медицинская помощь», шум двигателя, трансмиссии и ходовой системы, уровень внутреннего шума, санитарные нормы, спектр частот

Введение

В настоящее время парк автомобилей «Скорой медицинской помощи» состоит преимущественно из микроавтобусов на базе машин семейства «ГАЗель» либо микроавтобусов зарубежного производства («Мерседес», «Форд» и др.) того же класса. Как те, так и другие изначально проектируются производителями для перевозки пассажиров, в частности, в качестве маршрутных такси. Для использования машин в качестве «Скорой помощи» их салон дополнительно оснащается медицинским оборудованием и приборами, кушеткой для транспортировки пациента и креслами для медперсонала и сопровождающего. Серьезные изменения в конструкцию микроавтобусов, касающиеся основных узлов – двигателя, трансмиссии, ходовой системы и подвески, а также системы подпрессоривания кузова – не вносятся. Тем временем опыт использования таких машин показывает [1, 2, 3, 4], что шумо-виброзащищенность их салона часто не отвечает санитарным нормам. Повышенный уровень шума в салоне отрицательно влияет на состояние больного, а также на утомляемость медперсонала, находящегося в салоне в течение рабочей смены. Следовательно, актуальными являются научные работы, направленные на выявление реальной шумовой картины в салоне специального микроавтобуса для перевозки больных, и поиск путей снижения общего уровня внутреннего шума и его спектральных составляющих.

1. Основные источники шума

Основными источниками шума в специальном микроавтобусе являются двигатель и его системы, трансмиссия, шины, рама и кузов.

Одним из основных источников является двигатель с его системами, в том числе системами впуска и выпуска. Частота вращения валов современных двигателей достигает 6–7 тысяч оборотов в минуту, и при подаче в каждый из его цилиндров топливовоздушной смеси и ее воспламенении происходит мгновенное взрывообразное повышение давления, сопровождающееся колебаниями корпуса в акустическом диапазоне, то есть шумоизлучением. При течении смеси в системе впуска двигателя возникает так называемый вихревой шум. Интенсивное вихреобразование во впускном коллекторе происходит при преодолении различных гидравлических сопротивлений, при трении потока о стенки и главным образом при течении через клапан. Причиной появления шума выпуска служит истечение отработавших газов, обладающих высокой внутренней энергией, через выпускной клапан. Пиковые значения уровней шума, возникающие при этом в системах впуска и выпуска, составляют 130–140 дБ [5].

Коробка передач и ведущий мост автомобиля с входящими в них зубчатыми передачами являются источниками акустического излучения, возникающего при пересопряжении зубьев, изгибных и крутильных колебаниях валов и т. д. В подшипниках качения при повышенных зазорах происходят соударение тел качения в пределах зазора, что вызывает колебания этих деталей с акустическими частотами.

Дисковые тормоза, применяемые в настоящее время, при торможении создают шум, который часто называют писком тормозов.

Подвеска автомобиля выполняет несколько функций, тесно связанных с образованием внутреннего шума. Через шину она воспринимает возмущения от неравномерностей микропрофиля дорожного полотна и частично передает на раму возмущения от колес с широким диапазоном частот, в том числе акустических, которые вносят свою долю в общий уровень внутреннего шума.

Шины движущегося автомобиля являются одним из основных источников вибрации и шума, особенно при высоких скоростях движения. Шум, излучаемый шинами автомобиля при скоростях движения 90-110 км/ч, достигает 80 дБ [5].

Рама автомобиля также является одним из важных источников акустического излучения. При передаче на нее возмущающих сил от двигателя и других закрепленных на ней узлов трансмиссии лонжероны рамы деформируются и являются источником излучения внутреннего шума, особенно в диапазоне частот 70-200 Гц, что приводит к образованию высокого уровня шума в салоне (до 94 дБ) [5].

Звуковые волны возникают в салоне автомобиля и тогда, когда вибрации от источников по конструктивным элементам достигают металлических стенок кузова и возмущают (заставляют колебаться) их. Шум в салоне, возникающий от любого источника, многократно отражаясь от стенок кузова, являющегося в данном случае своеобразным резонатором, увеличивает в нем уровень звукового давления. Дополнительный шум, возникающий при отражении от стенок кузова, называется отраженным или вторичным шумом.

Все это создает сложную, постоянно меняющуюся картину акустического поля внутри салона, которую можно описывать лишь с использованием методов математической статистики. Некоторое представление об изменении уровня внутреннего шума от основных источников (коробки передач, кардана, ДВС, главной передачи и выхлопа) в зависимости от момента двигателя в автомобилях семейства «ГАЗель» показано на рисунок 1 [5].

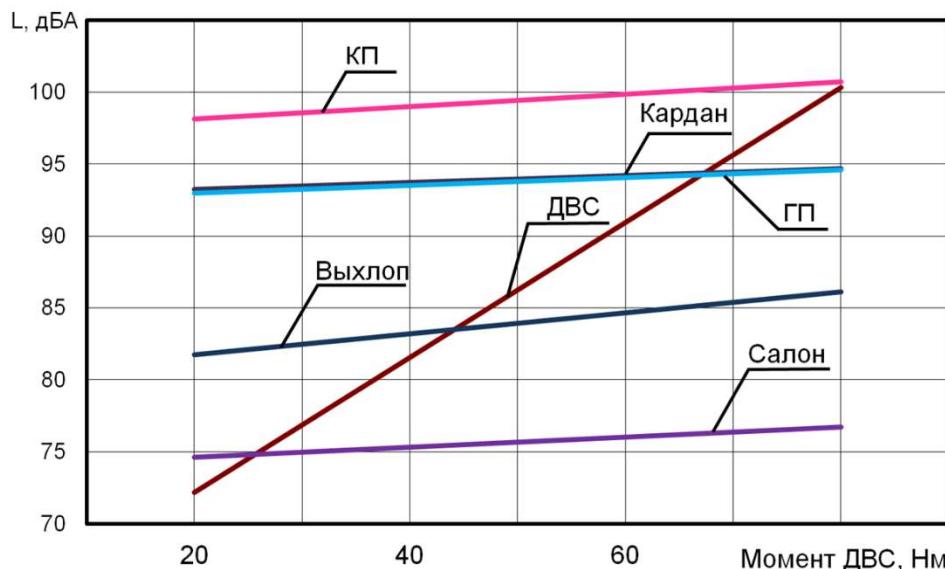


Рисунок 1 - Среднестатистические зависимости изменения уровня шума источников излучения от момента ДВС

2. Санитарные требования к уровню внутреннего шума

Санитарные нормы, определяющие допустимый уровень шума в салоне специального микроавтобуса, определены нормативным документом «СН 2.2.4/2.1.8.562-96 Шум на

рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Санитарные нормы» [6]. Приведем выдержку из этого документа. Предельно допустимые уровни звукового давления, уровни звука и эквивалентные уровни звука для основных наиболее типичных видов трудовой деятельности и рабочих мест

№ п/ п	Вид трудовой деятельности, рабочее место	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука и эквивалентны е уровни звука (дБА)
		31, 5	6 3	12 5	25 0	50 0	100 0	200 0	400 0	800 0	
Автобусы, грузовые, легковые и специальные автомобили											
15	Рабочие места водителей и обслуживающег о персонала легковых автомобилей и автобусов	93	7 9	70	63	58	55	52	50	49	60

Следует отметить, что уровень внутреннего шума в салоне и в кабине водителя машин «Скорой медицинской помощи» безусловно не должен превышать установленный выше приведенными нормами предельный уровень в 60 дБА, так как длительное восприятие пациентами шума высокого уровня во время перевозки может вызывать ухудшение здоровья перевозимого больного, а у водителя вызывать повышенную утомляемость и рассредоточение внимания, что может привести к дорожным происшествиям.

3. Экспериментальные исследования уровня внутреннего шума

Для получения картины шумового загрязнения салона и кабины водителя специального микроавтобуса «Скорая медицинская помощь» (иностранных производства, рисунок 2) выполнен ряд экспериментальных исследований.



a



б

Рисунок 2 - Микроавтобусы: а – Ford Transit; б – Mercedes-Benz Sprinter

Исследования выполнялись во время движения по трассе перевозки больного в кабине водителя, в салоне на месте кушетки больного и на месте сидения врача. Для исследований использовался SVAN 912M – комбинированный прибор, который является шумомером, виброметром и анализатором спектра (рисунок 3).



Рисунок 3 - Шумомер и спектроанализатор SVAN 912M

Для получения статистической картины шумового поля в кабине и салоне выполнено по 10 замеров общего уровня внутреннего шума на каждом выше указанном месте. Результаты исследований с определением общего уровня шума и его уровней в третьектавном спектре частот приведены ниже (рисунок 4-9 и таблицы 1-6).

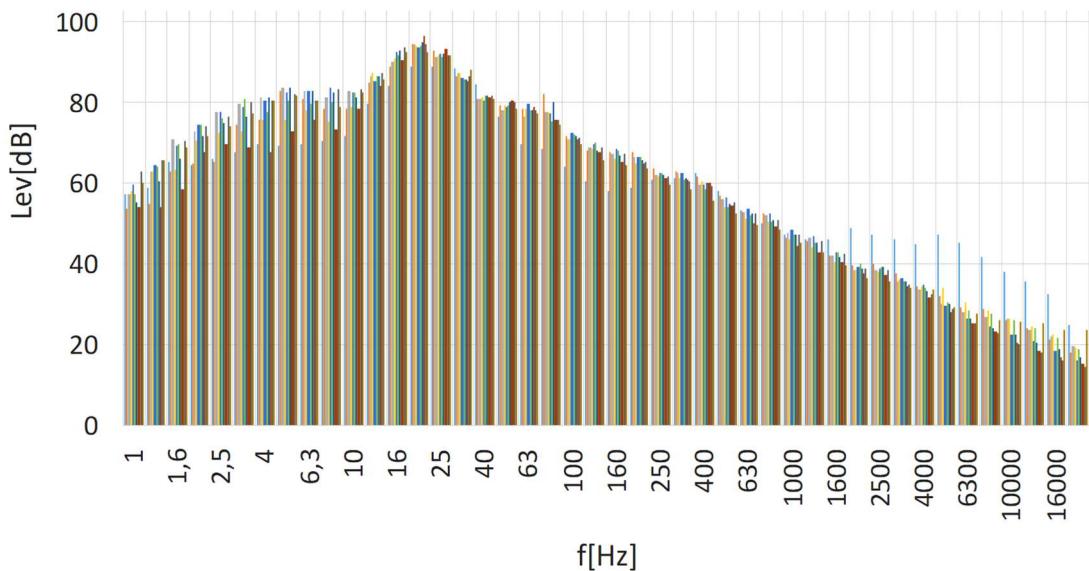


Рисунок 4 - Результат замеров шума в кабине водителя микроавтобуса Ford Transit

Таблица 1 - Общий уровень шума в кабине водителя микроавтобуса Ford Transit

Номер замера	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Уровень шума, дБА	63,8	65,9	64,6	64,1	65,1	64,3	64,6	63,7	64,0	62,0

Таблица 2 - Общий уровень шума в кабине водителя микроавтобуса Mercedes-Benz Sprinter

Номер замера	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Уровень шума, дБА	41,5	44,0	43,5	43,8	44,4	55,1	40,0	47,6	64,4	68,0

Таблица 3 - Общий уровень шума на кушетке пациента микроавтобуса Ford Transit

Номер замера	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Уровень шума, дБА	53,2	54,0	62,7	65,1	64,3	66,1	64,7	68,9	66,6	67,6

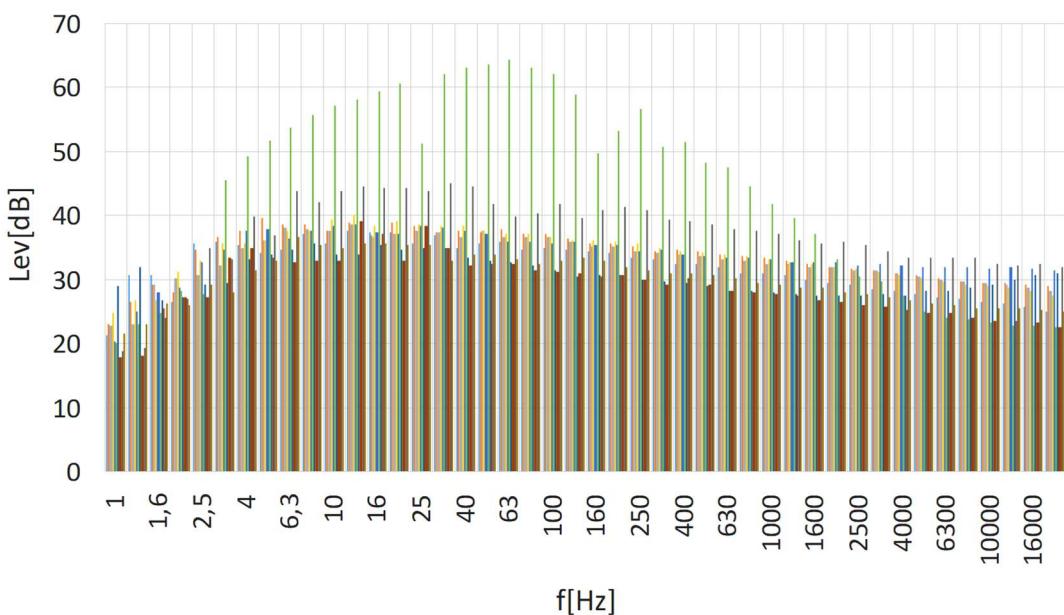


Рисунок 5 - Результат замеров шума в кабине водителя микроавтобуса Mercedes-Benz Sprinter

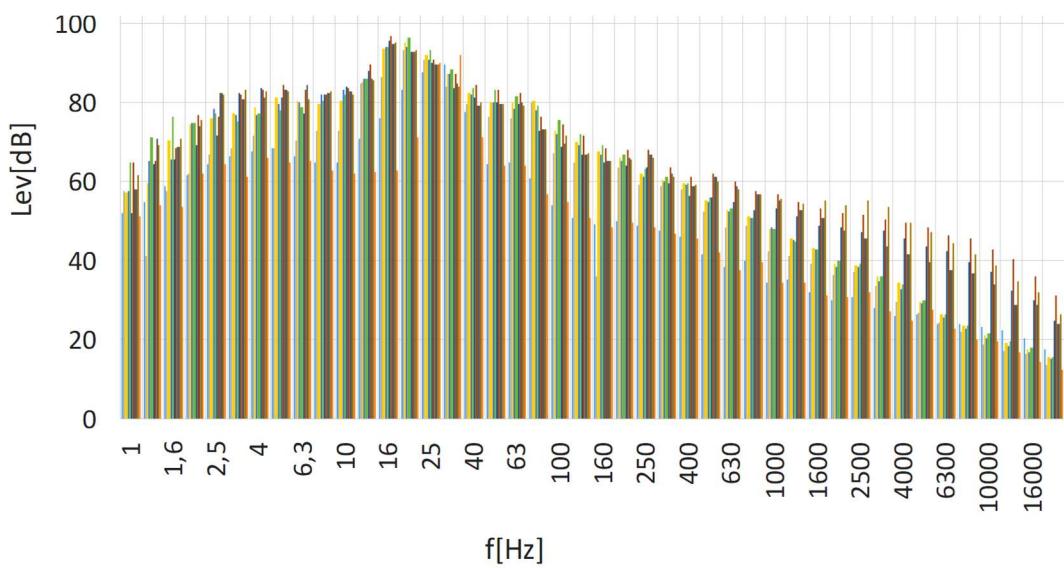


Рисунок 6 - Результат замеров шума на кушетке пациента микроавтобуса Ford Transit

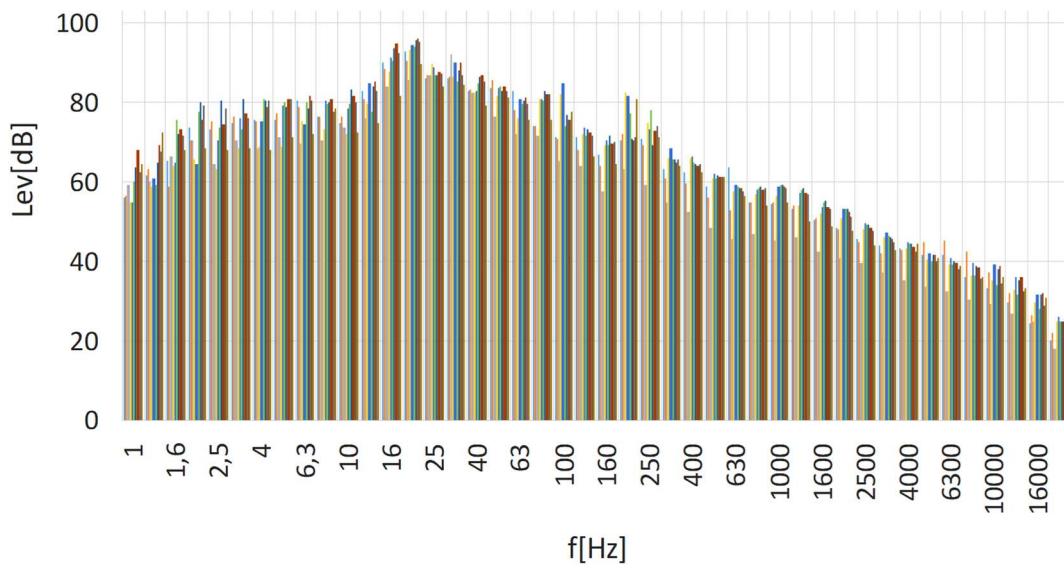


Рисунок 7 - Результат замеров шума на кушетке пациента микроавтобуса Mercedes-Benz Sprinter

Таблица 4 - Общий уровень шума на кушетке пациента микроавтобуса Mercedes-Benz Sprinter

Номер замера	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Уровень шума, дБА	67,3	60,4	74,2	74,1	72,9	70,5	70,4	70,6	72,0	75,1

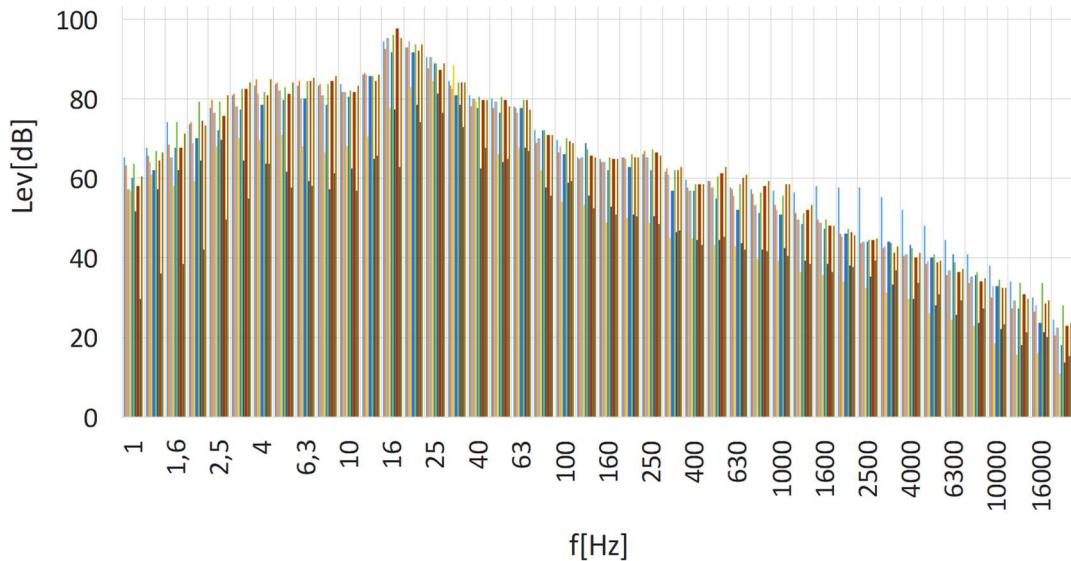


Рисунок 8 - Результат замеров шума на сиденье врача микроавтобуса Ford Transit

Таблица 5 - Общий уровень шума на сиденье врача микроавтобуса Ford Transit

Номер замера	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Уровень шума, дБА	68,6	65,6	64,4	54,0	62,9	66,4	58,7	66,9	52,9	67,4

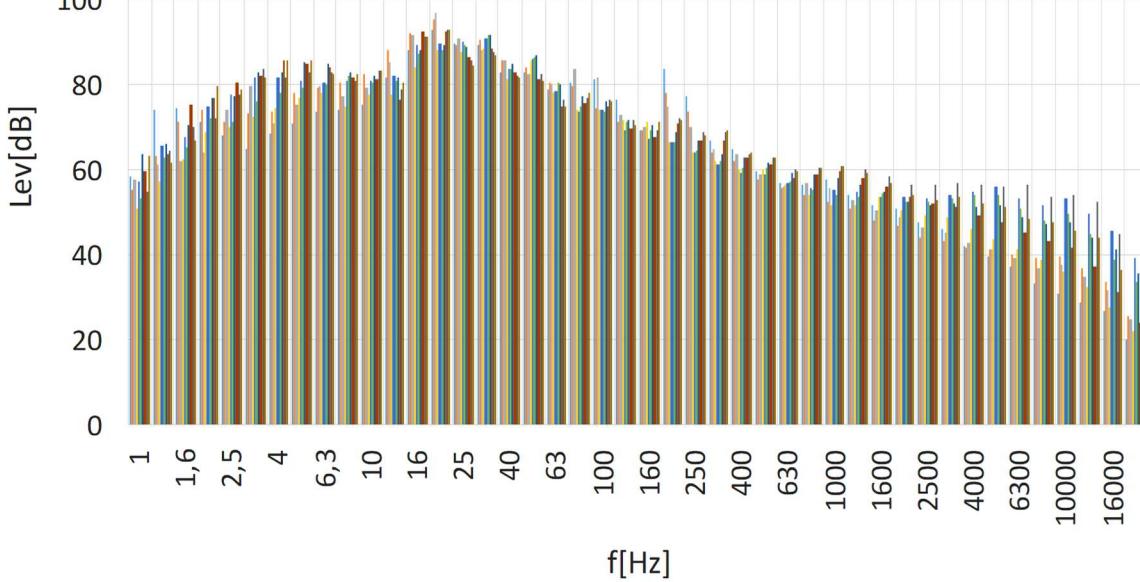


Рисунок 9 - Результат замеров шума на сиденье врача микроавтобуса Mercedes-Benz Sprinter

Таблица 6 - Общий уровень шума на сиденье врача микроавтобуса Mercedes-Benz Sprinter

Номер замера	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Уровень шума, дБА	75,1	70,9	70,3	67,2	68,3	68,3	69,6	69,6	71,9	71,0

4. Анализ результатов экспериментальных исследований

4.1. В кабине водителя микроавтобусов

Анализ приведенных гистограмм и табличных данных свидетельствует о том, что, как в кабине водителя микроавтобуса Ford Transit, так и в кабине Mercedes-Benz Sprinter общий уровень внутреннего шума превышает предел в 60 дБА, допускаемый санитарными нормами.

При этом общий уровень шума в кабине водителя микроавтобуса Ford Transit при всех 10 замерах превышает допускаемый и достигает максимального значения 65,9 дБА. Спектральные составляющие общего уровня шума превышают уровень в 60 дБА в интервале частот от 0 до 400 Гц, а на частотах 16 и 25 Гц третьоктавного спектра достигают значений 90-95 дБА то есть совершенно недопустимых значений.

В кабине микроавтобуса Mercedes-Benz Sprinter общий уровень внутреннего шума существенно ниже и превышает допустимый только при 2-х замерах из 10. Этому способствует более совершенная конструкция системы шумоизоляции рабочего места водителя. Спектральные составляющие превышают уровень в 60 дБА в диапазоне частот от 25 до 63 Гц третьоктавного спектра (отдельными всплесками). Таким образом, рабочее место микроавтобуса Mercedes-Benz Sprinter является существенно более шумозащищенным, нежели микроавтобуса Ford Transit.

4.2. На кушетке пациента

Общий уровень шума на кушетке пациента в салоне микроавтобуса Ford Transit в только при 2 замерах из 10 соответствует санитарным нормам, а его максимальное значение – 68,9 дБА. То есть допустимый санитарными нормами уровень явно превышен. Уровень спектральных составляющих превышает допустимый в диапазоне частот от 0 до 250 Гц, причем в диапазоне от 2,5 до 63 Гц превышает уровень в 80 дБА, достигая на частотах 16-25 Гц значений 90-95 дБа.

На кушетке пациента в салоне микроавтобуса Mercedes-Benz Sprinter при всех 10 замерах превышает допускаемый, достигает максимального значения 75,1 дБА, причем в 8 случаях из 10 превышает уровень 70 дБА. Уровень спектральных составляющих шума превышает допустимый также в диапазоне от 0 до 400 Гц, причем в диапазоне от 10 до 100 Гц превышает уровень в 80 дБА. То есть уровень шумозащиты пациента безусловно недостаточный и в том, и в другом микроавтобусах.

4.3. На сиденье врача

На сиденье врача микроавтобуса Ford Transit только при 3 замерах из 10 оказался в пределах допускаемого, а в 7 случаях превышает его, достигая максимального значения в 68,6 дБА. Спектральные составляющие уровня шума превышают 60 дБА в диапазоне от 0 до 630 Гц; в диапазоне от 2,5 до 63 Гц превышают уровень в 80 дБА, а на частотах 1-25 Гц имеют значения в районе 90-95 дБА.

В салоне микроавтобуса Mercedes-Benz Sprinter на сиденье врача общий уровень шума при всех 10 замерах превышает допустимый, причем в 5 случаях превышает 70 дБа. Уровень спектральных составляющих превышает допустимый также в диапазоне от 0 до 400 Гц, а на частотах 2,5-40 Гц превышает уровень в 80 дБА. Таким образом, и на сиденье врача в микроавтобусах наблюдается существенное превышение допустимого уровня шума.

Выводы

1. Выполненные экспериментальные исследования общего уровня внутреннего шума и его спектральных составляющих на рабочем месте водителя, в салоне на кушетке пациента и на сиденье врача специальных микроавтобусов Ford Transit и Mercedes-Benz Sprinter, используемых в качестве машин «Скорой медицинской помощи», показали существенное превышение допустимого санитарными нормами уровня в 60 дБА. Общий уровень шума в ряде случаев превышает 70 дБА, а уровни спектральных составляющих шума особенно высоки в области частот от 0 до 400 Гц третьоктавного спектра, причем в диапазоне частот от 16 до 25 Гц достигают значений в 90-95 дБА.

2. Полученные данные свидетельствуют о том, что необходимы мероприятия по совершенствованию конструкций микроавтобусов, используемых в качестве машин «Скорой медицинской помощи», направленные на улучшение шумозащищенности салона и кабины водителя и обеспечение уровня шума, не превышающего санитарные нормы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Удиванов, Е.С. Анализ вертикальных виброускорений салона автомобиля скорой медицинской помощи / Е.С. Удиванов // Конкурс научно-исследовательских работ студентов Волгоградского государственного технического университета (г. Волгоград, 25-29 апреля 2022 г.): тез. докл. / редкол.: С. В. Кузьмин (отв. ред.) [и др.] / редкол.: С. В. Кузьмин (отв. ред.) [и др.]; ВолгГТУ, Отдел координации научных исследований молодых ученых УНИИ, Общество молодых ученых. – Волгоград, 2022. – С. 110-111.
2. Вибрации в конструкциях автомобилей скорой медицинской помощи / Е.С. Удиванов, М.В. Ляшенко, В.В. Шеховцов, Е.В. Клементьев, А.И. Искалиев // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2022. – № 2 (39). – С. 45-50.
3. Совершенствование устройства крепления кузова к раме автомобиля скорой медицинской помощи / Е.В. Клементьев, В.В. Шеховцов, П.В. Потапов, Н.С. Соколов-Добрев, Е.С. Удиванов, А.В. Евсеева, Н.М. Лазаренков // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2025. - № 1 (50). - С. 71-77. - DOI: 10.35211/2500-0586-2025-1-50-71-77.
4. Евсеева, А.В. Конструктивные мероприятия по совершенствованию виброзащиты салона микроавтобусов скорой помощи / А.В. Евсеева // XXIX Региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области (г. Волгоград, 16 сентября – 15 ноября 2024 г.): сб. материалов конф. / редкол.: С. В. Кузьмин (отв. ред.) [и др.]; ВолгГТУ [и др.]. – Волгоград, 2024. – С. 59.
5. Долотов А.А. Вероятностная оценка шумности легковых автомобилей – дисс. ...к.т.н. – Волгоград, ВолгГТУ, 2022 г. – 169 с.
6. СН 2.2.4/2.1.8.562-96 Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Санитарные нормы. Постановление Госкомсанэпиднадзора России от 31.10.1996 № 36. – М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 1997. – 11 с.

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.

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.

Клементьев Евгений Владимирович
аспирант кафедры «Техническая
эксплуатация и ремонт
автомобилей» Волгоградского
государственного технического
университета, 400074, Волгоград,
ул. Академическая 1, тел. (8442)
97-48-67, e-eevgenii@mail.ru.

Долотов Александр Александрович
доцент кафедры «Техническая
эксплуатация и ремонт
автомобилей» Волгоградского
государственного технического
университета, 400005, РФ, г.
Волгоград, пр-т Ленина, 28, тел.
(8442) 24-81-16,
a_dolotov@vstu.ru.

Евсеева Апполинария Владимировна
аспирант кафедры «Техническая
эксплуатация и ремонт
автомобилей» Волгоградского
государственного технического
университета, 400005, РФ, г.
Волгоград, пр-т Ленина, 28, тел.
(8442) 24-81-16,
evseeva_apollinariya@mail.ru.

GODZHAEV Z.A., SHEKHOVTSOV V.V., POTAPOV P.V.,
KLEMENTIEV E.V., DOLOTOV A.A., EVSEEVA A.V.

EXPERIMENTAL STUDY OF INTERNAL NOISE LEVEL OF AMBULANCE VAN

Abstract. Authors performed the analysis of sources forming fields of internal noise in the driver cabin and the personnel compartment of the ambulance van such as engine aggregates, transmission, chassis and suspension. Range of experimental studies of general level of internal noise and its spectral components in the compartment – on the patient bed, the doctor seat, the driver cab during motion on a typical route was made. Studies were performed for ambulance vans which are based on Ford Transit and Mercedes-Benz Sprinter. Experiments results show significant excess of permissible sanitary standards of 60 dB(A). The overall noise level in some cases exceeds 70 dB(A), and levels of noise spectral components are significantly high in the frequency area from 0 to 400 Hz of the third octave spectrum, with the frequency diapason from 16 to 25 Hz reach values 90-95 dB(A). Thus, researches aimed to identification of the real noise scene in the compartment of an ambulance van for patients' transportation and search of ways for reducing of the overall internal noise level and its spectral components are topical.

Keywords: ambulance van, engine noise, transmission and chassis noise, internal noise level, sanitary standards, frequency specter.

BIBLIOGRAPHY

1. Udivanov, E.S. Analiz vertikal'nykh vibrouskorenij salona avtomobilya skoroj medicinskoj pomoshchi / E.S. Udivanov // Konkurs nauchno-issledovatel'skikh rabot studentov Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (g. Volgograd, 25-29 aprelya 2022 g.): tez. dokl. / redkol.: S. V. Kuz'min (otv. red.) [i dr.] / redkol.: S. V. Kuz'min (otv. red.) [i dr.]; VolGGTU, Otdel koordinacii nauchnykh issledovanij molodykh uchenykh UNII, Obshchestvo molodykh uchenykh. – Volgograd, 2022. – C. 110-111.
2. Vibracii v konstrukciyah automobilej skoroj medicinskoj pomoshchi / E.S. Udivanov, M.V. Lya-shenko, V.V. Shekhovcov, E.V. Klement'ev, A.I. Iskaliev // Ehnergo- i resursosberezenie: promyshlennost' i transport. – 2022. – № 2 (39). – C. 45-50.
3. Sovershenstvovanie ustrojstva krepleniya kuzova k rame avtomobilya skoroj medicinskoj pomo-shchi / E.V. Klement'ev, V.V. Shekhovcov, P.V. Potapov, N.S. Sokolov-Dobrev, E.S. Udivanov, A.V. Evseeva, N.M. Lazarenkov // Ehnergo- i resursosberezenie: promyshlennost' i transport. – 2025. – № 1 (50). – C. 71-77. - DOI: 10.35211/2500-0586-2025-1-50-71-77.
4. Evseeva, A.V. Konstruktivnye meropriyatiya po sovershenstvovaniyu vibrozashchity salona mikro-avtobusov skoroj pomoshchi / A.V. Evseeva // XXIX Regional'naya konferenciya molodykh uchenykh i issledova-telej Volgogradskoj oblasti (g. Volgograd, 16 sentyabrya – 15 noyabrya 2024 g.): sb. materialov konf. / redkol.: S. V. Kuz'min (otv. red.) [i dr.]; VolGGTU [i dr.]. – Volgograd, 2024. – C. 59.
5. Dolotov A.A. Veroyatnostnaya ocenka shumnosti legkovykh automobilej – diss. ...k.t.n. – Volgograd, VolGGTU, 2022 g. – 169 s.
6. SN 2.2.4/2.1.8.562-96 Shum na rabochikh mestakh, v pomeshcheniyakh zhilykh, obshchestvennykh zdanij i na territorii zhiloj zastroyki. Sanitarnye normy. Postanovlenie Goskomsanehpidnadzora Rossii ot 31.10.1996 № 36. – M.: Informacionno-izdatel'skij centr Minzdrava Rossii, 1997. – 11 s.

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.

Klementiev Evgeniy Vladimirovich
postgraduate student at the Technical
Operation and Service of
Automobiles Department, Volgograd
state technical university, 400005,
RF, Volgograd, Lenin ave. 28, tel.
(8442) 24-81-62, e-evgenii@mail.ru

Shekhovtsov Viktor Viktorovich
doctor in technical science, professor,
professor of Technical Operation and
Service of Automobiles Department,
Volgograd state technical university,
400005, RF, Volgograd, Lenin ave.
28, tel. (8442) 24-81-62,
shehovtsov@vstu.ru

Dolotov Aleksandr Aleksandrovich
Associate Professor at the Technical
Operation and Service of
Automobiles Department, Volgograd
state technical university, 400005,
RF, Volgograd, Lenin ave. 28, tel.
(8442) 24-81-62,
dolotov_aleks@mail.ru

Potapov Pavel Viktorovich
candidate of technical science, docent
at Technical Operation and Service
of Automobiles Department,
Volgograd state technical university,
400005, RF, Volgograd, Lenin ave.
28, tel. (8442) 24-81-62,
paulflinx@gmail.com

Evseeva Appolinariya Vladimirovna
postgraduate student at the Technical
Operation and Service of
Automobiles Department, Volgograd
state technical university, 400005,
RF, Volgograd, Lenin ave. 28, tel.
(8442) 24-81-62,
evseeva_apollinariya@mail.ru

© Годжаев З.А., Шеховцов В.В., Потапов П.В., Клементьев Е.В., Долотов А.А., Евсеева А.А., 2025

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

Адрес редакции:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»
302030, Орловская область, г. Орёл, ул. Московская, 34
+7 (905) 169 88 99

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

E-mail: radsu@rambler.ru

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 07.10.2025 г.

Дата выхода в свет 22.10.2025 г.

Формат 70Х108/16. Усл. печ. л. 14,875

Цена свободная. Тираж 1000 экз.

Заказ №241

Отпечатано с готового оригинал–макета
на полиграфической базе ОГУ имени И.С. Тургенева
302026, Орловская область, г. Орёл, ул. Комсомольская, д. 95