

**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:

Бухач А. д-р техн. наук, проф. (Польша)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## Содержание

### Теоретическая механика и ее приложения

Чернышев В.И., Фомина О.В. Верификация управляемых виброзащитных систем. 3

### Машиностроительные технологии и оборудование

Неменко А.В., Никитин М.М. Оценка временных характеристик финишной обработки тонкостенной оболочки. 14

Землянушинов Н.А., Дорохов Д.О., Радченко С.Ю., Землянушинова Н.Ю. Градиентное управляемое упрочнение пружин сжатия. 20

Лавриненко В.Ю., Серезжин М.А., Балахонцева Н.А., Садилов Ж. Экспериментальное исследование процесса гибки листовых заготовок на прессах и листоштамповочных молотах с использованием FDM-штампов. 27

Харченко А.О., Харченко А.А. Прогрессивные устройства и инструменты для мелкоразмерного резбонарезания в отверстиях. 35

Гоголев Г.В. Метод сравнения эффективности и массогабаритных показателей теплообменных аппаратов, используемых в энергетике и машиностроительных технологиях. 42

Ковалев В.Д., Панков В.П., Радченко С.Ю., Фурсина А.Б., Степанова М.В. Исследования дислокационной структуры лопаток турбин авиационных ГТД в процессе эксплуатации. 48

Неменко А.В., Никитин М.М. Управление параметрами финишной обработки полированием поверхностей вращения. 60

Смоленцев Е.В., Кондратьев М.В., Грицюк В.Г., Ковалев С.В. Оптимизация процесса проектирования обработки комбинированными методами. 69

Фроленкова Л.Ю., Шоркин В.С., Крыгина Е.П., Кошечкина А.И. Методика расчета и анализа адгезионных процессов, происходящих в биметаллических проводах под действием высоких температур. 74

Максимов И.С., Рахчеев В. Г., Галанский С.А., Максимова Т.С. Определение термодинамического состояния композиционных шлифовальных кругов и обработанной поверхности рельсов в процессе шлифования. 82

Братан С.М., Дымченко И.А., Головин В.И., Новоселов Ю.К. Методика расчета числа операций при тонком шлифовании валков холодной прокатки и ее экспериментальная проверка. 90

### Машиноведение и мехатроника

Корнеев А.Ю., Ли Шэнбо, Кольцов А.Ю., Мищенко Е.В., Савин Л.А. Расчет кривых подвижного равновесия в конических подшипниках жидкого трения. 106

Родичев А.Ю., Горин А.В., Родичева И.В., Серебрянников А.Д., Васильев К.В. Применение метода бесконтактной тепловой диагностики подшипников скольжения. 115

Космодамианский А.С., Злобин С.Н., Измеров О.В. Синхронные тяговые электродвигатели в приводах перспективных локомотивов. 124

Казаков Ю.Н., Хан Юлей, Джоу Венянь, Савин Л.А. Высоконагруженные подшипники скольжения с профилированными поверхностями. 138

Дудоров Е.А. Метод копирующего управления с обратной силомоментной связью. 145

### Приборы, биотехнические системы и технологии

Гайнуллина Я.Н., Калинин М.И., Паиков Е.В., Четвёркин А.А. Особенности проектирования и изготовления гипербарических модулей аппарата жидкостного дыхания. 156

Балакин А.И., Мирзоян Н.Ю., Балакина Н.А. Анализ влияния зазора между вихрековым преобразователем и поверхностью на точность контроля. 164

Свириденко И.И., Шевелев Д.В., Тишков В.Ф., Безотосный С.С., Григорьева В.Н. Экспериментальная СВЧ-становка обезвреживания опасных медицинских отходов. 170

### Контроль, диагностика, испытания и управление качеством

Ивахненко А.Г., Анисеева О.В., Кириллов О.Н. Исследование свойств системы менеджмента качества при нелинейном характере потенциала промышленного предприятия. 182

Балашов М.Г., Жибоедов В.В., Лекарев Г.В. Использование модельных исследований для определения ходкости судов. 188

**Адрес редакции**

302030, Орловская обл., г. Орел, ул.

Московская, 34

+7 (905) 169 88 99

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

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

Зарег. в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Свидетельство ПИ № ФС77-67029

от 30 августа 2016 года

Подписной индекс 29504

по объединенному каталогу

«Пресса России»

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

© ОГУ имени И.С. Тургенева, 2023

Журнал индексируется в системе

Российского индекса научного цитирования

РИНЦ, а также в международных системах

Chemical Abstracts и Google Scholar.

В соответствии с письмом ВАК от 06.12.2022

№02-1198 «О Перечне рецензируемых научных изданий», журнал

«Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии» как издание, входящее в международную базу данных

Chemical Abstracts, приравнивается к изданиям категории К1.

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

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

## Editorial Committee

### Editor-in-chief

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

### Editor-in-chief Assistants:

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

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

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

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

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

### Member of editorial board:

Bukhach A. Doc. Sc. Tech., Prof. (Poland)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### Responsible editor:

Tyukhta A.V. Candidate Sc. Tech.

### Address

302030, Oryol region, Oryol, st.

Moskovskaya, 34

+7 (905) 169 88 99

https://oreluniver.ru/science/journal/fipptt

E-mail: 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, 2023

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

### Theoretical mechanics and its applications

Chernyshev V.I., Fominova O.V. Verification of controlled vibration protective systems ..... 3

### Machine-building technologies and equipment

Nemenko A.V., Nikitin M.M. Evaluation of the thin-wall shell finishing time characteristics 14

Zemlyanushnov N.A., Dorohov D.O., Radchenko S.Y., Zemlyanushnova N.Y. Gradient controlled hardening of compression springs ..... 20

Lavrinenko V.Yu., Serezhkin M.A., Balakhontseva N.A., Sadykov Zh. Experimental research of the process of bending for sheet blanks on presses and sheet hammers by using of FDM dies ..... 27

Kharchenko A.O., Kharchenko A.A. Progressive devices and tools for small threading in holes ..... 35

Gogolev G.V. Method of comparison of the efficiency and weight and dimensional indicators of heat exchangers used in the power industry and machine-building technologies ..... 42

Kovalev V.D., Pankov V.P., Radchenko S.Y., Fursina A.B., Stepanova M.V. Studies of the dislocation structure of turbine blades of aviation gas turbine engines during operation... 48

Nemenko A.V., Nikitin M.M. Parameters management of rotation surfaces finishing by polishing ..... 60

Smolentsev E.V., Kondratev M.V., Gritsyuk V.G., Kovalev S.V. Optimization of processing design by combined methods ..... 69

Frolenkova L.Yu., Shorkin V.S., Krygina E.P., Konisheva A.I. Method of calculation and analysis of adhesion processes occurring in bimetallic wires under high temperatures ..... 74

Maksimov I.S., Rakhcheev V.G., Galanskiy S.A., Maksimova T.S. Determination of the thermodynamic state of composite grinding wheels and the machined rail surface in the grinding process ..... 82

Bratan S.M., Dymchenko I.A., Golovin V.I., Novoselov Y.K. Method of calculation of the number of operations in the thin grinding of cold rolls and its experimental verification .. 90

### Machine Science and Mechatronics

Korneev A.Yu., Li Shengbo, Koltsov A.Yu., Mishchenko E.V., Savin L.A. The dynamic equilibrium surfaces calculation in the liquid friction conical bearings ..... 106

Rodichev A.Yu., Gorin A.V., Rodicheva I.V., Serebrennikov A.D., Vasiliev K.V. Application of the method of non-contact thermal diagnosis of plain bearings ..... 115

Kosmodamianskiy A.S., Zlobin S.N., Izmerov O.V. Synchronous traction electric motors in drives of perspective locomotives ..... 124

Kazakov Y.N., Hang Yulei, Zhou Wen Yan, Savin L.A. Evaluation of the effect of deformations of satellite axes of planetary gearboxes on the load capacity of sliding bearings ..... 138

Dudorov E.A. The method of gearbox control with the force-torque feedback ..... 145

### Devices, biotechnical systems and technologies

Gaimullina Ya.N., Kalinin M.I., Pashkov E.V., Chetverkin A.A. Features of the design and manufacture of hyperbaric modules of the device liquid breathing ..... 156

Balakin A.I., Mirzoyan N.Yu., Balakina N.A. Analysis of the effect of the gap between the eddy current converter and the surface on the control accuracy ..... 164

Sviridenko I.I., Shevelev D.V., Tishkov V.F., Bezotosny S.S., Grigorieva V.N. The experimental SHF-facility for the dangerous medical waste treatment ..... 170

### Monitoring, Diagnostics, Testing and Quality Management

Ivakhnenko A.G., Anikeeva O.V., Kirillov O.N. Investigation of the properties of the quality management system with the nonlinear nature of the potential of an industrial enterprise ..... 182

Balashov M.G., Giboedov V.V., Lekarev G.V. Model research of propulsion of semisubmersible floating cranes ..... 188

The journal is included in the «List of peer-reviewed scientific publications in which the main scientific results of dissertations for obtaining the scientific degree of the candidate of sciences, for the academic degree of the doctor of sciences» of the Higher Attestation Commission for the following groups of scientific specialties:

2.2.4. Instruments and measurement methods (by types of measurements) (technical sciences), 2.2.5. Navigation devices (technical sciences), 2.2.8. Methods and devices for monitoring and diagnosing materials, products, substances and the natural environment (technical sciences), 2.2.11. Information-measuring and control systems (technical sciences), 2.2.12. Devices, systems and products for medical purposes (technical sciences), 2.5.2. Mechanical engineering (technical Sciences), 2.5.3. Friction and wear in machines (technical sciences), 2.5.4. Robots, mechatronics and robotic systems (technical sciences), 2.5.5. Technology and equipment for mechanical and physical-technical processing (technical sciences), 2.5.6. Engineering technology (technical sciences), 2.5.7. Technologies and machines for forming (technical sciences), 2.5.22. Quality control products. Standardization. Organization of production (technical Sciences).

**ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ**

УДК 62-52

DOI: 10.33979/2073-7408-2023-358-2-3-13

В.И. ЧЕРНЫШЕВ, О.В. ФОМИНОВА

**ВЕРИФИКАЦИЯ УПРАВЛЯЕМЫХ ВИБРОЗАЩИТНЫХ СИСТЕМ**

**Аннотация.** В статье рассматриваются теоретические аспекты верификации управляемых виброзащитных систем на основе использования оценок соответствия между компонентами вектора состояния системы, присоединённого вектора и управления, принятой в классической теории оптимального управления. Для проведения верификации необходимо иметь математическую модель исследуемой системы, а также прогнозную модель оптимального типа. Если результаты прогноза вибрационного состояния совпадают с фактическим вибрационным состоянием исследуемой модели, то это означает, что исследуемая модель является оптимальной. Приведён ряд теоретических выкладок, которые поясняют особенности проведения верификационных исследований в рамках решения оптимизационных задач управления.

Выполнен комплекс вычислительных экспериментов для выяснения оптимальности предлагаемых алгоритмов управления процессом демпфирования для базовых моделей систем виброзащиты и виброизоляции. Были установлены основополагающие факты и закономерности, которые характеризуют данные базовые модели как оптимально управляемые динамические объекты:

– работа демпфера вязкого сопротивления в режиме «включить-выключить» является необходимым условием формирования компенсационных воздействий активного типа;

– оптимальный процесс прерывистого демпфирования обеспечивает затухание переходных процессов в пределах одного периода кинематического возмущения, что характеризуется как «один толчок – одно колебание»;

– установлен принцип дуальности, в соответствии с которым утверждается наличие двух равнозначных алгоритмов оптимального управления установившимися колебаниями, один из которых реализуется на основе информации об относительном движении системы, то есть посредством актуализации конструктивных элементов.

Приведены также примеры верификации активных систем виброзащиты в том числе с электромеханическим исполнительным механизмом «винт-гайка».

**Ключевые слова:** оптимальное управление, верификация, виброзащита, виброизоляция, прогнозная модель, базовая модель с прерывистым демпфированием, активная система виброзащиты.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Елисеев А.В., Сельвинский В.В., Елисеев С.В. Динамика вибрационных взаимодействий элементов технологических систем с учётом неударяющих связей. – Новосибирск: Наука, 2015. – 332 с.
2. Гордеев Б.А., Ерофеев В.И., Плехов А.С. Математические модели адаптивных виброизоляторов мобильных и стационарных объектов. – Нижний Новгород. Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2017. – 124 с.
3. Sutar S., Warudkar V., Sukathankar R. Vibration analysis of rotating machines with case studies // International journal of scientific & technology research. – 2018. – Vol. 7. – Issue 7. – pp. 70–76.
4. Пановко Г.Я. Динамика вибрационных технологических процессов. – М.: Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, Институт компьютерных исследований, 2019. – 176 с.
5. Блехман И.И. Что может вибрация? О «вибрационной механике» и вибрационной технике. – М.: Ленанд, 2017. – 216 с.
6. Абакумов А.М., Рандин Д.Г. Исследование эффективности активной системы виброзащиты с магнитоэологическим демпфером // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2016. – № 6. – С. 68-71.
7. Sharma S. Vibration control in quarter-car model with magnetorheological (MR) dampers using Bingham model // Journal of applied mechanical engineering. – 2018. – Vol. 7. – pp. 299.
8. Wang Y., Li S., Neild S. A., Jiang J. Z. Comparison of the dynamic performance of nonlinear one and two degree-offreedom vibration isolators with quasi-zero stiffness // Nonlinear Dynamics. – 2017. – Vol. 88. – No. 1. – pp. 635–654.
9. Inman D.J. Vibration with control. – John Wiley & Sons, 2017. – 440 p.
10. Михайлов В. П., Аунг Т. Л. Инженерная методика расчёта и экспериментальные исследования платформы для активной виброзащиты // Труды МФТИ. – 2018. – Том 10. – № 1. – С. 92–96.
11. Shi P., Shi P., Nie G., Ye T., Pan D. Improvement of vibration isolation performance of QZS platform in chaotic interval based on damping increase control method // Journal of Vibroengineering. – 2018. – Vol. 20. – Issue 8. – pp. 3009–3025.

12. Xu J., Sun X. Multi-directional vibration isolator based on quasi-zero-stiffness structure and time-delayed active control // International Journal of Mechanical Sciences. – 2015. – Vol. 100. – pp. 126–135.
13. Хамитов Р.Н., Татевосян А.А., Аверьянов Г.С. Амортизатор с электромагнитным демпфером // Патент РФ 2517016. – 2014. – Бюл. – № 15.
14. Игараси М. Устройство управления колебаниями и система управления колебаниями // Патент РФ № 2637079. – 2017. – Бюл. – № 34.
15. Горнов А.Ю. Верификация постановки и решения задачи оптимального управления // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2006. № 2 (26). – С. 131–138.
16. Фомина О.В. Методика верификации управляемых виброзащитных систем // Мир транспорта и технологических машин. – 2018. – № 4. – С. 2–11.
17. Чернышев В.И., Савин Л.А., Фомина О.В. Непрямое управление колебаниями: элементы теории // Труды СПИИРАН. – 2019. – Том 18. – № 1. – С. 148–175.
18. Leander R., Lenhart S., Protopopescu V. Optimal control of continuous systems with impulse controls // Optimal Control Applications & Methods. – 2015. – Vol. 36. – No. 4. pp. 535–549.
19. Дыхта В.А., Самсонок О.Н. Оптимальное импульсное управление с приложениями. – М.: Физматлит, 2003. – 256 с.
20. Решмин Б.И. Имитационное моделирование и системы управления. – М.: Инфра-Инженерия, 2016. – 74 с.
21. Denai M. A., Palis F., Zeghib A. Modeling and control of non-linear systems using soft computing techniques // Applied Soft Computing. – 2007. – Vol. 7. – No. 3. – pp. 728–738.
22. Pidd. M. Systems modelling, theory and practice. – John Wiley & Sons, 2004. – 236 p.
23. Kluever C.A. Dynamic systems: modeling, simulation, and control. – John Wiley & Sons, 2015. – 496 p.
24. Fabien B. Analytical system dynamics: modeling and simulation. – Springer, 2008. – 338 p.
25. Chiu J.T., Fang C.C. Soft computing technologies in design of fuzzy controller for active vibration isolation systems // Journal of Marine Science and Technology. – 2016. – Vol. 24. – No. 3. – pp. 519–529.

**Чернышев Владимир Иванович**

Орловский государственный университет  
имени И.С. Тургенева.  
302020, Орел, Наугорское шоссе, 29.  
Док. техн. наук, профессор кафедры  
мехатроники, механики и робототехники  
E-mail: chernyshev\_46@mail.ru

**Фомина Ольга Владимировна**

Орловский государственный университет  
имени И.С. Тургенева.  
302020, Орел, Наугорское шоссе, 29.  
Канд. техн. наук, доцент кафедры  
мехатроники, механики и робототехники  
E-mail: garil@list.ru

---

V.I. CHERNYSHEV, O.V. FOMINOVA

## VERIFICATION OF CONTROLLED VIBRATION PROTECTIVE SYSTEMS

**Abstract.** *The article discusses the theoretical aspects of verification of controlled vibration protection systems based on the use of conformity estimates between the components of the state vector of the system, the attached vector, and control adopted in the classical theory of optimal control. For verification, it is necessary to have a mathematical model of the system under study, as well as a predictive model of the optimal type. If the results of the prediction of the vibrational state coincide with the actual vibrational state of the investigated model, then this means that the studied model is optimal. A number of theoretical calculations are presented that explain the features of verification studies in the framework of solving optimization management problems.*

*A set of computational experiments has been performed to determine the optimality of the proposed damping control algorithms for the base models of vibration protection and vibration isolation systems. Founding facts and patterns were established that characterize these basic models as optimally controlled dynamic objects:*

- *the operation of the viscous resistance damper in the on-off mode is a necessary condition for the formation of compensatory effects of the active type;*
- *the optimal intermittent damping process provides transient attenuation within the same period of kinematic disturbance, which is characterized as "one push - one oscillation";*
- *the principle of duality is established, according to which the existence of two equivalent algorithms for optimal control of steady-state oscillations is confirmed, one of which is implemented on the basis of information about the relative motion of the system, that is, due of the actualization of structural elements.*

*An example of verification according to the fact-forecast scheme of an active vibration protection system is also given.*

**Keywords:** *optimal control, verification, vibration protection, vibration isolation, predictive model, basic model with discontinuous damping, active vibration protection system.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Yeliseyev A.V., Selvinskiy V.V., Yeliseyev S.V. Dinamika vibratsionnykh vzaimodeystviy elementov tekhnologicheskikh sistem s uchotom neuderzhivayushchikh svyazey. – Novosibirsk: Nauka, 2015. – 332 s.

2. Gordeyev B.A., Yerofeyev V.I., Plekhov A.S. Matematicheskiye modeli adaptivnykh vibrozolyatorov mobilnykh i statsionarnykh ob"yektov. – Nizhniy Novgorod. Nizhegorodskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet im. R.Ye. Alekseyeva, 2017. – 124 s.
3. Sutar S., Warudkar V., Sukathankar R. Vibration analysis of rotating machines with case studies // International journal of scientific & technology research. – 2018. – Vol. 7. – Issue 7. – pp. 70–76.
4. Panovko G.YA. Dinamika vibratsionnykh tekhnologicheskikh protsessov. – M.: Izhevsk: Regul'yarnaya i khaoticheskaya dinamika, Institut kompyuternykh issledovaniy, 2019. – 176 s.
5. Blekhman I.I. Chto mozhet vibratsiya? O «vibratsionnoy mekhanike» i vibratsionnoy tekhnike. – M.: Lenand, 2017. – 216 s.
6. Abakumov A.M., Randin D.G. Issledovaniye effektivnosti aktivnoy sistemy vibrozashchity s magnitnoreologicheskim dempferom // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika. – 2016. – № 6. – S. 68–71.
7. Sharma S. Vibration control in quarter-car model with magnetorheological (MR) dampers using Bingham model // Journal of applied mechanical engineering. – 2018. – Vol. 7. – pp. 299.
8. Wang Y., Li S., Neild S. A., Jiang J. Z. Comparison of the dynamic performance of nonlinear one and two degree-offreedom vibration isolators with quasi-zero stiffness // Nonlinear Dynamics. – 2017. – Vol. 88. – No. 1. – pp. 635–654.
9. Inman D.J. Vibration with control. – John Wiley & Sons, 2017. – 440 p.
10. Mikhaylov V. P., Aung T. L. Inzhenernaya metodika raschota i eksperimentalnyye issledovaniya platformy dlya aktivnoy vibrozashchity // Trudy MFTI. – 2018. – Tom 10. – № 1. – С. 92–96.
11. Shi P., Shi P., Nie G., Ye T., Pan D. Improvement of vibration isolation performance of QZS platform in chaotic interval based on damping increase control method // Journal of Vibroengineering. – 2018. – Vol. 20. – Issue 8. – pp. 3009–3025.
12. Xu J., Sun X. Multi-directional vibration isolator based on quasi-zero-stiffness structure and time-delayed active control // International Journal of Mechanical Sciences. – 2015. – Vol. 100. – pp. 126–135.
13. Khamitov R.N., Tatevosyan A.A., Averyanov G.S. Amortizator s elektromagnitnym dempferom // Patent RF 2517016. – 2014. – Byul. – № 15.
14. Igarasi M. Ustroystvo upravleniya kolebaniyami i sistema upravleniya kolebaniyami // Patent RF № 2637079. – 2017. – Byul. – № 34.
15. Gornov A.YU. Verifikatsiya postanovki i resheniya zalachi optimalnogo upravleniya // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2006. № 2 (26). – S. 131–138.
16. Fominova O.V. Metodika verifikatsii upravlyayemykh vibrozashchitnykh sistem // Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. – 2018. – № 4. – S. 2–11.
17. Chernyshev V.I., Savin L.A., Fominova O.V. Nepryamoye upravleniye kolebaniyami: elementy teorii // Trudy SPIIRAN. – 2019. – Tom 18. – № 1. – С. 148–175.
18. Leander R., Lenhart S., Protopopescu V. Optimal control of continuous systems with impulse controls // Optimal Control Applications & Methods. – 2015. – Vol. 36. – No. 4. pp. 535–549.
19. Dykhta V.A., Samsonyuk O.N. Optimalnoye impulsnoye upravleniye s prilozheniyami. – M.: Fizmatlit, 2003. – 256 s.
20. Reshmin B.I. Imitatsionnoye modelirovaniye i sistemy upravleniya. – M.: Infra-Inzheneriya, 2016. – 74 s.
21. Denai M. A., Palis F., Zeghib A. Modeling and control of non-linear systems using soft computing techniques // Applied Soft Computing. – 2007. – Vol. 7. – No. 3. – pp. 728–738.
22. Pidd. M. Systems modelling, theory and practice. – John Wiley & Sons, 2004. – 236 p.
23. Kluever C.A. Dynamic systems: modeling, simulation, and control. – John Wiley & Sons. 2015. – 496 p.
24. Fabien B. Analytical system dynamics: modeling and simulation. – Springer, 2008. – 338 p.
25. Chiu J.T., Fang C.C. Soft computing technologies in design of fuzzy controller for active vibration isolation systems // Journal of Marine Science and Technology. – 2016. – Vol. 24. – No. 3. – pp. 519–529.

**Chernyshev Vladimir Ivanovich**

Orel State University  
named after I.S. Turgenev.  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29.  
Doctor of technical Sciences, Professor of the  
Department mechatronics, mechanics and robotics  
E-mail: chernyshev\_46@mail.ru

**Fominova Olga Vladimirovna**

Orel State University  
named after I.S. Turgenev.  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29.  
Candidate of technical Sciences, Associate Professor of  
the Department mechatronics, mechanics and robotics  
E-mail: garil@list.ru

© В.И. Чернышев, О.В. Фомина, 2023

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

УДК 621.9.06

DOI: 10.33979/2073-7408-2023-358-2-14-19

А.В. НЕМЕНКО, М.М. НИКИТИН

### **ОЦЕНКА ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ТОНКОСТЕННОЙ ОБОЛОЧКИ**

**Аннотация.** Предложена методика оценки временных характеристик технологического процесса финишной обработки деталей вида тонкостенной оболочки на основании марковского случайного блуждания между поглощающими уровнями с непрерывным фазовым пространством состояний. Обработка рассматривается как многостадийный процесс, в ходе которого меняется контрольный параметр, влияющий на его завершение. В качестве поглощающих уровней рассматриваются верхнее и нижнее значения контрольного параметра, по достижении которых, соответственно, изделие считается изготовленным или необратимо испорченным. Предложенным способом могут быть найдены среднее технологическое время, его дисперсия и среднее квадратическое отклонение, для которых получены непосредственные расчетные формулы в виде сумм соответствующих числовых рядов.

**Ключевые слова:** финишная обработка, тонкостенные оболочки, выход годных, технологическое время, производственное время, марковский процесс, случайное блуждание.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Сверхпластическая формовка конструкционных сплавов / Под ред. Пейтона Н., Гамильтона К. М.: Металлургия, 1985. 312 с.
2. Заказнов Н.П. Изготовление асферической оптики./Н.П. Заказнов, В.В. Горелик – М.: Машиностроение, 1978. – 248 с.
3. Seeds R.B. Yield Economic, and Logistic Models for Complex Digital Arrays // IEEE Int. Conv. Rec. 1967. Pt. 6. P. 61-66.
4. Богданов Ю. И. Статистические модели управления дефектностью и выходом годных в микроэлектронике/ Богданов Ю. И., Богданова Н., Дшхунян В. Л. //Микроэлектроника. – 2003. – Т. 32. – №. 1. – С. 77-77.
5. Kumar, N., Kennedy, K., Gildersleeve, K., Abelson, R., Mastrangelo, C. M., & Montgomery, D. C. (2006). A review of yield modelling techniques for semiconductor manufacturing. International Journal of Production Research, 44(23), 5019-5036.
6. Соколов Г.А. Теория вероятностей. Управляемые цепи Маркова в экономике/Г. А. Соколов, Н.А. Чистякова – М.: Физматлит, 2005 – 248 с.
7. Неменко А.В. Управление финишной обработкой криволинейной поверхности по критерию геометрического соответствия/А.В. Неменко, М.М. Никитин//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2019, №4-1(336),с.191 - 196.
8. Alexandra V/ Nemekeo, Michael M. Nikitin. Forecast estimator of surface machining completion. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2019, vol. 709, # 022006
9. Неменко А.В. Применение упругих деформаций к формообразованию параболического зеркала/А.В. Неменко, М.М. Никитин//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2020, №3(341),С.11 – 19.
10. Неменко А.В. Управление процессом получения поверхностей второго порядка при финишной обработке/А.В. Неменко, М.М. Никитин//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2020, №4(342),С.52 – 58.
11. Неменко А.В. Оптимизация временных характеристик процессов финишной обработки/А.В. Неменко, М.М. Никитин//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2021, №1(345),С. 34-38.
12. Неменко А.В. Построение оптимального технического обслуживания технологической линии/А.В. Неменко, М.М. Никитин//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2021, №2(346),С. 42-50.
13. Неменко А.В. Предотвращение технологической усталости при финишной обработке детали/А.В. Неменко, М.М. Никитин//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2021, №3(347),С. 49-56.

14. Неменко А.В. Компенсация упругих перемещений при механической обработке детали / А.В. Неменко, М.М. Никитин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2021, №3(347), С. 73-77.

15. Неменко А.В. Дальний прогноз эксплуатационной надежности производственной системы / А.В. Неменко, М.М. Никитин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2022, №4(354), с. 58 - 64.

**Неменко Александра Васильевна**

ФГАОУ «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Цифровое проектирование»

299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

Тел. +79788330519

E-mail: valesan@list.ru

**Никитин Михаил Михайлович**

ФГАОУ «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь

Старший преподаватель кафедры «Высшая математика»

299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

Тел. +79788150316

E-mail: m.nikitin.1979@gmail.com

A.V. NEMENKO, M.M. NIKITIN

## EVALUATION OF THE THIN-WALL SHELL FINISHING TIME CHARACTERISTICS

**Abstract.** *A technique for estimating the time characteristics of the technological process of finishing processing of thin-walled shell parts based on a Markov random walk between absorbing levels with a continuous phase space of states is proposed. Processing is considered as a multi-stage process, during which the control parameter that affects its completion changes. The upper and lower values of the control parameter are considered as absorbing levels, upon reaching which, respectively, the product is considered to be manufactured or irreversibly damaged. The proposed method can be used to find the average technological time, its dispersion and standard deviation, for which direct calculation formulas are obtained in the form of sums of the corresponding numerical series.*

**Keywords:** *finishing, thin-walled shells, yield, technological time, production time, Markov process, random walk*

### BIBLIOGRAPHY

1. Sverhplasticheskaja formovka konstrukcionnyh splavov / Pod red. Pejtona N., Gamiltona K. M.: Metallurgija, 1985. 312 s.
2. Zakaznov N.P. Izgotovlenie asfericheskoj optiki./N.P. Zakaznov, V.V. Gorelik – M.: Mashinostroenie, 1978. – 248 s.
3. Seeds R.B. Yield Economic, and Logistic Models for Complex Digital Arrays // IEEE Int. Conv. Rec. 1967. Pt. 6. P. 61-66.
4. Bogdanov Ju. I. Statisticheskie modeli upravlenija defektnostju i vyhodom godnyh v mikrojelektronike/ Bogdanov Ju. I., Bogdanova N., Dshhunjan V. L. //Mikrojelektronika. – 2003. – T. 32. – №. 1. – S. 77-77.
5. Kumar, N., Kennedy, K., Gildersleeve, K., Abelson, R., Mastrangelo, C. M., & Montgomery, D. C. (2006). A review of yield modelling techniques for semiconductor manufacturing. International Journal of Production Research, 44(23), 5019-5036.
6. Sokolov G.A. Teorija verojatnostej. Upravljaemye cepi Markova v jekonomike/G. A. Sokolov, N.A. Chistjakova – M.: Fizmatlit, 2005 – 248 s.
7. Nemenko A.V. Upravlenie finishnoj obrabotkoj krivolinejnoj poverhnosti po kriteriju geometricheskogo sootvetstvija/A.V. Nemenko, M.M. Nikitin//Fundamentalnye i prikladnye problemy tehnik i tehnologii, 2019, №4-1(336),s.191 - 196.
8. Alexandra V. Nemeko, Michael M. Nikitin. Forecast estimator of surface machining completion. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2019, vol. 709, # 022006
9. Nemenko A.V. Primenenie uprugih deformacij k formoobrazovaniju parabolicheskogo zerkala/A.V. Nemenko, M.M. Nikitin//Fundamentalnye i prikladnye problemy tehnik i tehnologii, 2020, №3(341),S.11 – 19.
10. Nemenko A.V. Upravlenie processom poluchenija poverhnostej vtorogo porjadka pri finishnoj obrabotke/A.V. Nemenko, M.M. Nikitin//Fundamentalnye i prikladnye problemy tehnik i tehnologii, 2020, №4(342),S.52 – 58.
11. Nemenko A.V. Optimizacija vremennyh harakteristik processov finishnoj obrabotki/A.V. Nemenko, M.M. Nikitin//Fundamentalnye i prikladnye problemy tehnik i tehnologii, 2021,№1(345),S. 34-38.
12. Nemenko A.V. Postroenie optimalnogo tehniceskogo obsluzhivanija tehnologicheskoi linii/A.V. Nemenko, M.M. Nikitin//Fundamentalnye i prikladnye problemy tehnik i tehnologii, 2021,№2(346),S. 42-50.

13. Nemenko A.V. Predotvrashhenie tehnologicheskoy ustalosti pri finishnoj obrabotke detali/A.V. Nemenko, M.M. Nikitin//Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii, 2021, №3(347), S. 49-56.

14. Nemenko A.V. Kompensaciya uprugih peremeshhenij pri mehanicheskoy obrabotke detali / A.V. Nemenko, M.M. Nikitin // Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii, 2021, №3(347), S. 73-77.

15. Nemenko A.V. Dalnij prognoz jekspluatacionnoj nadezhnosti proizvodstvennoj sistemy/A.V. Nemenko, M.M. Nikitin//Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii, 2022, №4(354), s.58 - 64.

**Nemenko Alexandra Vasilyevna**

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

**Nikitin Mikhail Mikhailovich**

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

© А.В. Неменко, М.М. Никитин, 2023

УДК 621.73

DOI: 10.33979/2073-7408-2023-358-2-20-26

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

## **ГРАДИЕНТНОЕ УПРАВЛЯЕМОЕ УПРОЧНЕНИЕ ПРУЖИН СЖАТИЯ**

***Аннотация.** Проанализирован процесс упрочнения пружин сжатия пластическим деформированием – контактным заневоливанием. Варьируя нагрузкой контактного заневоливания, можно управляемо формировать локальную пластическую зону поверхностного упрочнения пружины. Активной деформируемой зоной является локальная зона, которая находится в местах контакта витков по всей длине пружины. Варьируя высотой пружины перед заневоливанием, можно управляемо формировать зону объемного упрочнения пружины. Контактное заневоливание можно отнести к градиентно управляемым процессам упрочнения пружин. Размеры зон и степень их упрочнения зависят от технологических параметров контактного заневоливания. Представлена классификационная схема процессов пластического упрочнения пружин с учетом контактного заневоливания.*

***Ключевые слова:** градиентно упрочненные структуры, контактное заневоливание, пластическая поверхностная обработка.*

***Работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации (приказ Минобрнауки России от 26 января 2021 года № 54, проект СП-3658.2021.1)***

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Блинник, С. И. Расчёт пружин в связи с их заневоливанием / С. И. Блинник // Новые методы расчёта пружин / Под общей редакцией С. Д. Пономарёва – М.: Машигиз. – 1946. – С. 26-46.
2. Голенков, В. А. Формирование градиентных субмикро- и наноструктурных состояний комплексным локальным нагружением очага деформации / В. А. Голенков, С. Ю. Радченко, Д. О. Дорохов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2009. – № 3(51). – С. 54-56.
3. Дорохов, Д. О. Перспективы применения комплексного локального деформирования к изготовлению биметаллических подшипников / Д. О. Дорохов, А. А. Кисловский // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2013. – № 3-2(299). – С. 99-102.
4. Землянушов, Н.А. Повышение ресурса высоконагруженных пружин сжатия: Монография / Н.А. Землянушов, Н.Ю. Землянушнова, А.А. Порохня. – Ставрополь: Изд-во СКФУ, 2019. – 169 с.
5. Исследование релаксационной стойкости винтовых цилиндрических пружин при длительной выдержке под нагрузкой / В. П. Белогур, В. В. Ворошилин, Г. А. Данилин [и др.] // Металлообработка. – 2014. – № 3(81). – С. 30-35.
6. Кычкин, В. И. Применение цифровой модели газораспределительного механизма двигателя внутреннего сгорания на виртуальных лабораторных работах в учебном процессе / В. И. Кычкин, И. Э. Шаякбаров, Д. В. Власов // Транспортное дело России. – 2019. – № 1. – С. 193-197.
7. Лавриненко, Ю. А. Разработка методики проектирования технологических процессов изготовления высоконагруженных пружин сжатия / Ю. А. Лавриненко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – № 9-1. – С. 421-428.



8. Лавриненко, Ю. А. Разработка технологии изготовления пружины клапана двигателя легкового автомобиля / Ю. А. Лавриненко // Заготовительные производства в машиностроении. – 2017. – Т. 15. – № 12. – С. 547-554.

9. Пономарев, С. Д. К обоснованию размеров упругого ядра в заневоленных пружинах / С. Д. Пономарёв // Изв. вузов. – Машиностроение, 1974. – № 10. – С. 24-27.

10. Тебенко, Ю. М. Применение контактного заневоливания для изготовления пружин откатных механизмов / Ю. М. Тебенко // Оборонный комплекс - научно-техническому прогрессу России. – 2018. – № 3(139). – С. 16-24.

11. Тебенко, Ю.М. Проблемы производства высокоскоростных пружин и пути их решения. Монография. – Ставрополь: ООО «Мир данных», 2007. – 152 с.

12. Golenkov, V. A. The numerical mathematical modeling of gradient hardening processes under conditions of complex local loading of the center of deformation / V. A. Golenkov, D. O. Dorokhov, S. Y. Radchenko // Materials Science Forum. – 2020. – Vol. 989. – P. 615-621. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.989.615

13. Manouchehrynia R., Abdullah S., Singh S. S. K. Fatigue-based reliability in assessing the failure of an automobile coil spring under random vibration loadings // Engineering Failure Analysis. - 2022. Vol. 131, 105808. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105808

**Землянушнов Никита Андреевич**

ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», г. Ставрополь  
Старший преподаватель кафедры технологии машиностроения и технологического оборудования  
355017, Россия, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1  
Тел.: 8-928-315-50-04  
E-mail: nikita3535@mail.ru

**Дорохов Даниил Олегович**

ФГАОУ ВО «Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева», г. Орёл  
Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры машиностроения  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел.: 8-910-208-44-02  
E-mail: ddostu@mail.ru

**Радченко Сергей Юрьевич**

ФГАОУ ВО «Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева», г. Орёл  
Доктор технических наук, профессор, проректор по научно-технологической деятельности и аттестации научных кадров  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел.: 8-905-169-88-99  
E-mail: radsu@rambler.ru

**Землянушнова Надежда Юрьевна**

ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», г. Ставрополь  
Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии машиностроения и технологического оборудования  
355017, Россия, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1  
Тел.: 8-928-300-49-38  
E-mail: zemlyanushnova@rambler.ru

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

**GRADIENT CONTROLLED HARDENING OF COMPRESSION SPRINGS**

**Abstract.** *The process of hardening compression springs by plastic hardening – contact hardening is analyzed. By varying the load of contact hardening, it is possible to form a local plastic zone of surface hardening of spring in a controlled manner. The active deformable zone is the local zone, which is located at contact points of coils along entire length of spring. By varying height of spring before hardening, it is possible to controllably form zone of volumetric hardening of spring. Contact hardening can be attributed to gradient-controlled processes of spring hardening. The size of zones and the degree of their hardening depend on technological parameters of contact drilling. A classification scheme of spring plastic hardening processes is presented, taking into account contact hardening.*

**Keywords:** *gradient-hardened structures, contact predeformation, plastic surface treatment (of metals).*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Blinnik, S. I. Calculation of springs in connection with their sedimentation / S. I. Blinnik // New methods of calculation of springs / Under the general editorship of S. D. Ponomarev – M.: Mashigiz. – 1946. – pp. 26-46.
2. Golenkov, V. A. Formation of gradient submicro- and nanostructural states by multiplex local loading of the deformation focus / V. A. Golenkov, S. Yu. Radchenko, D. O. Dorokhov // Hardening technologies and coatings. – 2009. – No. 3(51). – pp. 54-56.
3. Dorokhov, D. O. Prospects for the application of complex local deformation to the manufacture of bimetallic bearings / D. O. Dorokhov, A. A. Kislovsky // Fundamental and applied problems of engineering and technology. – 2013. – No. 3-2(299). – pp. 99-102.
4. Zemlyanushnov, N.A. Increasing the resource of high-loaded compression springs: Monograph / N.A. Zemlyanushnova, N.Yu. Zemlyanushnova, A.A. Porokhnya. – Stavropol: Publishing House of NCFU, 2019. – 169 p.

5. Investigation of relaxation resistance of helical cylindrical springs under prolonged exposure under load / V. P. Belogur, V. V. Voroshilin, G. A. Danilin [et al.] // *Metalloobrabotka*. – 2014. – No. 3(81). – pp. 30-35.
6. Kychkin, V. I. Application of a digital model of the gas distribution mechanism of an internal combustion engine on virtual laboratory work in the educational process / V. I. Kychkin, I. E. Shayakbarov, D. V. Vlasov // *Transport business of Russia*. – 2019. – No. 1. – pp. 193-197.
7. Lavrinenko, Yu.A. Development of the method of designing technological processes for manufacture of high load compression springs / Y.A. Lavrinenko // *News of Tula State University. Technical science*. – 2017. – Vol. 9 (1). – pp. 421-428.
8. Lavrinenko Yu. A. Development of manufacturing technology for the valve spring of a passenger car engine // *Procurement productions in mechanical engineering*. – 2017. – Vol. 15. – No. 12. – pp. 547-55.
9. Ponomarev, S. D. To substantiate the dimensions of the elastic core in the wound springs / S. D. Ponomarev // *Izv. vuzov. – Mechanical Engineering*, 1974. – No. 10. – pp. 24-27.
10. Tebenko Yu. M. The use of contact predeformation for the manufacture of sliding mechanisms springs // *Defense complex - scientific and technical progress of Russia*. – 2018. – No. 3(139). – pp. 16-24.
11. Tebenko, Yu.M. Problems of production of high-speed springs and ways to solve them. Monograph. – Stavropol: LLC "World of data", 2007. – 152 p.
12. Golenkov, V. A. The numerical mathematical modeling of gradient hardening processes under conditions of complex local loading of the center of deformation / V. A. Golenkov, D. O. Dorohov, S. Y. Radchenko // *Materials Science Forum*. – 2020. – Vol. 989. – pp. 615-621. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.989.615
13. Manouchehrynia R., Abdullah S., Singh S. S. K. Fatigue-based reliability in assessing the failure of an automobile coil spring under random vibration loadings // *Engineering Failure Analysis*. - 2022. Vol. 131, 105808. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105808

**Zemlyanushnov Nikita Andreevich**

North-Caucasus Federal University,  
Senior Lecturer of the Department of Mechanical Engineering Technology and Technological Equipment  
355017, Russia, Stavropol, Pushkin str., 1  
Phone number: 8-928-315-50-04  
E-mail: nikita3535@mail.ru

**Dorohov Daniil Olegovich**

Orel State University named after I.S. Turgenev  
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,  
Professor of the Department of Mechanical Engineering  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
Phone number: 8-910-208-44-02  
E-mail: ddoistu@mail.ru

**Radchenko Sergey Yuryevich**

Orel State University named after I.S. Turgenev  
Doctor of Technical Sciences, Professor, vice-rector for scientific and technological activities and certification of scientific personnel  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
Phone number: 8-905-169-88-99  
E-mail: radsu@rambler.ru

**Zemlyanushnova Nadezhda Yurievna**

North-Caucasus Federal University,  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Head of the Department of Mechanical Engineering Technology and Technological Equipment  
355017, Russia, Stavropol, Pushkin str., 1  
Phone number: 8-928-300-49-38  
E-mail: zemlyanushnova@rambler.ru

© Н.А. Землянушнов, Д.О. Дорохов, С.Ю. Радченко, Н.Ю. Землянушнова, 2023

УДК.621.7

DOI: 10.33979/2073-7408-2023-358-2-27-34

В.Ю. ЛАВРИНЕНКО, М.А. СЕРЕЖКИН, Н.А. БАЛАХОНЦЕВА, Ж. САДИКОВ

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ГИБКИ ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК НА ПРЕССАХ И ЛИСТОШТАМПОВОЧНЫХ МОЛОТАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ FDM-ШТАМПОВ**

**Аннотация.** В статье приведены результаты экспериментальных исследований процесса гибки листовых заготовок на прессе и листоштамповочном молоте при использовании рабочего инструмента, изготовленного из пластика PLA методом FDM печати (FDM-штампов). Установлена возможность применения FDM-штампов для обеспечения требуемой точности деталей при изготовлении деталей гибкой на прессах и молотах в условиях единичного (мелкосерийного) производства. Кроме этого, для некоторых материалов совместное использование бабы листоштамповочного молота с наполнителем и FDM-штампа позволило уменьшить угол упругого пружинения и повысить точность заготовок после гибки от 2 до 8 раз.

**Ключевые слова:** гибка листовых заготовок, пресс, листоштамповочный молот, FDM – штампы, упругое пружинение, точность деталей после гибки

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романовский, В. П. Справочник по холодной штамповке/ В. П. Романовский. - Л.: Машиностроение, 1979. – 520 с.
2. Бойко А.Ю. Специальные виды штамповки: учеб. пособие /А.Ю. Бойко, А.М. Гольцев, С.Л. Новокщёнов. Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2009. 236 с.
3. Какие есть плюсы и минусы у полиуретана. URL: <https://msel.ru/articles/kakie-est-plyusy-i-minusy-u-poliuretana/?ysclid=lddzor3y9995016543>
4. Бабурин М.А., Баскаков В.Д., Герасимов Н.В. и др. Анализ формоизменения заготовок при вытяжке полусферических деталей с применением промежуточных деформируемых сред. Кузнечно–штамповочное производство. Обработка материалов давлением, 2014, No 7, с. 21–24.
5. Рынок технологий 3D-печати в России и мире: перспективы внедрения аддитивных технологий в производство URL: <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/rynok-tekhnologii-3d-pecati-v-rossii-i-mire-perspektivy-vnedreniya-additivnykh-tekhnologii-v-proizvodstvo>
6. Трубащевский Д., Гринин Е., ULTEM – аддитивное производство из материала будущего. Умное производство, 2016, №1(33), с. 29-34.
7. Колесников Л.А., Манжула Г.П., Шелег В.К., Якимович А.М. Состояние и перспективы развития технологий быстрого прототипирования в промышленности (Часть 2). Наука и техника, 2013, No 6, с. 8–16
8. Durgun, I. Sheet metal forming using FDM rapid prototype tool. Rapid Prototyping Journal, 2015, 21(4), 412–422.
9. The jaw-dropping perks of 3d printed press brake tooling [Электронный ресурс] // CI Stories. URL: <https://www.e-ci.com/ci-stories/2019/5/24/the-jaw-dropping-perks-of-3d-printed-press-brake-tooling> (Дата обращения: 30.11.2020)
10. 3D printed press brake forming tools [Электронный ресурс] // Proto G. URL: <https://www.instructables.com/id/3D-Printed-Press-Brake-Forming-Tools/> (Дата обращения: 30.11.2020).
11. Naotaka Nakamura, Ken-ichiro Mori, Fumie Abe, Yohei Abe. Bending of sheet metals using plastic tools made with 3D printer. 17th International Conference on Metal Forming, Metal Forming 2018, 16-19 September 2018, Toyohashi, Japan.
12. Liewald, M., & de Souza, J. H. C. New developments on the use of polymeric materials in sheet metal forming. Production Engineering, 2008, 2(1), 63–72.
13. Григоренко Г.Д., Евсюков С.А. Исследование влияния технологических параметров FDM прототипирования на механические характеристики получаемых деталей штампов // Заготовительные производства в машиностроении. 2017. № 4. С. 22.
14. Сержкин М.А., Климык Д.О., Плохих А.И. Анализ возможности использования 3d-печати для быстрого инструментального производства в области холодной листовой штамповки // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2020. № 3 (341). С. 20-30.
15. Климык Д.О., Сержкин М.А. 3D-печать инструмента для мелкосерийной холодной листовой штамповки / В сборнике: Будущее машиностроения России. тринадцатая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (с международным участием): сборник докладов: в 2 т. Союз машиностроителей России, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет). Москва, 2020. С. 95-97.
16. Klimyuk D., Serezhkin M.A., Plokhikh A.I. Application of 3d printing in sheet metal forming. В сборнике: Materials Today: Proceedings. Ser. "International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2020, ICMTME 2020" 2021. С. 1579-1583.
17. Патент на полезную модель РФ № 182 269. Баба молота №2 / Лавриненко В.Ю., Демин В.А., Чекалов В.В., Чуваев И.С. опубл. 09.08.2018 Бюл. № 22.
18. Патент на полезную модель РФ № 203749. Баба листоштамповочного молота / Лавриненко В.Ю., Семенов И.Е., Демин В.А., Шагалева Р.Р. опубл. 19.04.2021. Бюл. №11.
19. Лавриненко В.Ю., Чуваев И.С. Экспериментальные исследования гибки листовых заготовок на молотах // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2016. №3 (317). С.133-136.
20. Лавриненко В.Ю., Шагалева Р.Р., Повышение точности деталей при штамповке на листоштамповочных молотах // XLIV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства: сборник тезисов. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. Т.2. С. 429-430.

**Лавриненко Владислав Юрьевич**

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
 Доктор технических наук, заведующий кафедрой «Технология обработки материалов»  
 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр.1  
 Тел.: +7 (499) 267-02-36  
 E-mail: vlavrinenko@bmstu.ru

**Сержкин Михаил Александрович**

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
 Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология обработки материалов»  
 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр.1  
 Тел.: +7 (499) 267-02-36  
 E-mail: pehobator@gmail.com

**Балахонцева Наталия Андреевна**

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
 Старший преподаватель кафедры «Технология обработки материалов»  
 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр.1

**Садиков Жасурбек**

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
 Студент 4 курса кафедры «Технология обработки материалов»  
 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр.1

V.Yu. LAVRINENKO, M.A. SEREZHKIN, N.A. BALAKHONTSEVA, Zh. SADYKOV

## **EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE PROCESS OF BENDING FOR SHEET BLANKS ON PRESSES AND SHEET HAMMERS BY USING OF FDM DIES**

**Abstract.** *The results of experimental research of the processes of bending for sheet blanks on presses and sheet hammers by using of tools made of PLA plastic using the FDM printing method (FDM-dies) are presented.*

*The possibility of using FDM-dies to ensure the required accuracy of parts in the manufacture of parts on presses and hammers in a single (small-scale) production has been established. In addition, for some materials, the combined using of a stamping hammer head with filler and FDM-dies allow to reduce the angle of elastic springback and increase the accuracy of parts after bending up to 2–8 times.*

**Keywords:** *bending of sheet blanks, press, sheet stamping hammer, FDM - dies, elastic springback, accuracy of parts after bending.*

### **BIBLIOGRAPHY**

1. Romanovskij, V. P. Spravochnik po holodnoj shtampovke/ V. P. Romanovskij. - L.: Mashinostroenie, 1979. – 520 s.
2. Bojko A.YU. Specialnye vidy shtampovki: ucheb. posobie /A.YU. Bojko, A.M. Golcev, S.L. Novokshchyonov. Voronezh: GOUVPO «Voronezhskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet», 2009. 236 s.
3. Kakie est plyusy i minusy u poleuretana. URL: <https://msel.ru/articles/kakie-est-plyusy-i-minusy-u-poliuretana/?ysclid=lddzor3y9995016543>
4. Baburin M.A., Baskakov V.D., Gerasimov N.V. i dr. Analiz formoizmeneniya zagotovok pri vytyazhke polusfericheskikh detalej s primeneniem promezhutochnyh deformiruemyh sred. Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem, 2014, No 7, s. 21–24.
5. Rynok tekhnologij 3D-pechati v Rossii i mire: perspektivy vnedreniya additivnyh tekhnologij v proizvodstvo URL: <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/rynok-tekhnologii-3d-pechati-v-rossii-i-mire-perspektivy-vnedreniya-additivnyx-tekhnologii-v-proizvodstvo>
6. Trubashevskij D., Grinin E., ULTEM – additivnoe proizvodstvo iz materiala budushchego. Umnoe proizvodstvo, 2016, №1(33), s. 29-34.
7. Kolesnikov L.A., Manzhula G.P., Sheleg V.K., YAkimovich A.M. Sostoyanie i perspektivy razvitiya tekhnologij bystrogo prototipirovaniya v promyshlennosti (CHast 2). Nauka i tekhnika, 2013, No 6, s. 8–16
8. Durgun, I. Sheet metal forming using FDM rapid prototype tool. Rapid Prototyping Journal, 2015, 21(4), 412–422.
9. The jaw-dropping perks of 3d printed press brake tooling [Elektronnyj resurs] // CI Stories. URL: <https://www.e-ci.com/ci-stories/2019/5/24/the-jaw-dropping-perks-of-3d-printed-press-brake-tooling> (Data obrashcheniya: 30.11.2020)
10. 3D printed press brake forming tools [Elektronnyj resurs] // Proto G. URL: <https://www.instructables.com/id/3D-Printed-Press-Brake-Forming-Tools/> (Data obrashcheniya: 30.11.2020).
11. Naotaka Nakamura, Ken-ichiro Mori, Fumie Abe, Yohei Abe. Bending of sheet metals using plastic tools made with 3D printer. 17th International Conference on Metal Forming, Metal Forming 2018, 16-19 September 2018, Toyohashi, Japan.
12. Liewald, M., & de Souza, J. H. C. New developments on the use of polymeric materials in sheet metal forming. Production Engineering, 2008, 2(1), 63–72.
13. Grigorenko G.D., Evsyukov S.A. Issledovanie vliyaniya tekhnologicheskikh parametrov FDM prototipirovaniya na mekhanicheskie harakteristiki poluchaemyh detalej shtampov // Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii. 2017. № 4. S. 22.
14. Serezhkin M.A., Klimyuk D.O., Plohih A.I. Analiz vozmozhnosti ispolzovaniya 3d-pechati dlya bystrogo instrumentalnogo proizvodstva v oblasti holodnoj listovoj shtampovki // Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. 2020. № 3 (341). S. 20-30.
15. Klimyuk D.O., Serezhkin M.A. 3D-pechat instrumenta dlya melkoserijnoj holodnoj listovoj shtampovki / V sbornike: Budushchee mashinostroeniya Rossii. trinadcataya Vserossijskaya konferenciya molodyh uchenyh i specialistov (s mezhdunarodnym uchastiem): sbornik dokladov: v 2 t. Soyuz mashinostrotelej Rossii, Moskovskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet imeni N.E. Baumana (nacionalnyj issledovatel'skij universitet). Moskva, 2020. S. 95-97.
16. Klimyuk D., Serezhkin M.A., Plokhikh A.I. Application of 3d printing in sheet metal forming. V sbornike: Materials Today: Proceedings. Ser. "International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2020, ICMTMTÉ 2020" 2021. S. 1579-1583.
17. Patent na poleznuyu model RF № 182 269. Baba molota №2 / Lavrinenko V.YU., Demin V.A., CHekalov V.V., CHuvaev I.S. opubl. 09.08.2018 Byul. № 22.
18. Patent na poleznuyu model RF № 203749. Baba listoshtampovochnogo molota / Lavrinenko V.YU., Semenov I.E., Demin V.A., SHagaleev R.R. opubl. 19.04.2021. Byul. №11.

19. Lavrinenko V.YU., CHuvaev I.S. Eksperimentalnye issledovaniya gibki listovykh zagotovok na molotah // Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. 2016. №3 (317). S.133-136.

20. Lavrinenko V.YU., SHagaleev R.R., Povyshenie tochnosti detalej pri shtampovke na listoshtampovochnykh molotah // XLIV Akademicheskie chteniya po kosmonavtike, posvyashchennye pamyati akademika S.P. Korolyova i drugih vydayushchihsvya otechestvennykh uchenykh — pionerov osvoeniya kosmicheskogo prostranstva: sbornik tezisov. Moskva: Izdatelstvo MGTU im. N.E. Baumana, 2020. T.2. S. 429-430.

**Vladislav Lavrinenko**

Bauman Moscow State Technical University  
Doctor of Tech. Science, Head of Department  
«Technology of material working»  
105005, Moscow, 2-ya Baumanskaya, 5  
Tel.: +7 (499) 267-02-36  
E-mail: vlavrinenko@bmsu.ru

**Michail Serezhkin**

Bauman Moscow State Technical University  
Candidate of Tech. Science, Docent of Department  
«Technology of material working»  
105005, Moscow, 2-ya Baumanskaya, 5  
Tel.: +7 (499) 267-02-36  
E-mail: pehobator@gmail.com

**Nataliya Balakhontseva**

Bauman Moscow State Technical University  
Senior Lecturer of Department «Technology of material  
working»  
105005, Moscow, 2-ya Baumanskaya, 5  
Tel.: +7 (499) 267-02-36  
E-mail: bmsu-bna@mail.ru

**Zhasurbek Sadykov**

Bauman Moscow State Technical University  
Student of Department «Technology of material  
working»  
105005, Moscow, 2-ya Baumanskaya, 5  
Tel.: +7 (499) 267-02-36  
E-mail: bmsu-bna@mail.ru

© В.Ю. Лавриненко, М.А. Серезкин, Н.А. Балахонцева, Ж. Садиков, 2023

УДК 621.993.1

DOI: 10.33979/2073-7408-2023-358-2-35-41

А.О. ХАРЧЕНКО, А.А. ХАРЧЕНКО

## ПРОГРЕССИВНЫЕ УСТРОЙСТВА И ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ МЕЛКОРАЗМЕРНОГО РЕЗЬБОНАРЕЗАНИЯ В ОТВЕРСТИЯХ

**Аннотация.** В статье представлены результаты исследований в направлении совершенствования технологического оборудования для внутренней резьбообработки. Проектирование устройств и инструментов для мелкоразмерной резьбообработки является актуальной задачей, для выполнения которой необходимо на основе системного подхода создать варианты оборудования, оценить эффективность принимаемых решений с учетом опыта, накопленного исследователями и разработчиками в данной области. Представлено устройство, позволяющее повысить надежность метчиков и защитить их от поломки по предельно допустимому крутящему моменту. Метчики с новой геометрией зубьев заборной части позволяют равномерно распределить нагрузку по поверхности зуба при работе. При этом более нагруженные первые зубья обладают исключительно высокими режущими свойствами. Кроме того, значительно уменьшены (до 15%) крутящие нагрузки на метчик, увеличена его стойкость (в 1,2 раза), а также повышено качество обработки за счет уменьшения подрезания и разбивания первых витков резьбы.

**Ключевые слова:** мелкоразмерное резьбонарезание, резьбонарезная головка, устройство для нарезания резьбы, механизм защиты инструмента, метчик, зубья заборной части, качество обработки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матвеев В.В. Нарезание точных резьб / В.В. Матвеев. – М.: Машиностроение, 1978. – 88 с.
2. Фрумин Ю.Л. Высокопроизводительный резьбообразующий инструмент / Ю.Л. Фрумин. – М.: Машиностроение, 1977. – 183 с.
3. Якухин В.Г. Оптимальная технология изготовления резьб / В.Г. Якухин. – М.: Машиностроение, 1985. – 184 с.
4. Братан С.М. Повышение точности формообразования мелкоразмерных резьб метчиками в алюминиевых сплавах: монография / С.М. Братан, Ф.Н. Канареев, П.А. Новиков, А.О. Харченко. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2017. – 164 с.
5. Tapping units [Электронный ресурс]. URL: <https://www.hagengobel.de/en/produkte> (дата обращения: 08.02.2023).
6. Харченко А.О. Структурно-компоновочный синтез подсистем модулей для внутренней резьбообработки / А.О. Харченко, А.А. Харченко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», 2020. № 4-2 (342).– С.85-94. DOI: 10.33979/2073-7408-2020-342-4-2-85-94.

7. Харченко А.О. Анализ и синтез структур современных многооперационных станков: практикум / А.О. Харченко, С.М. Братан, Е.А. Владецкая, С.И. Рощупкин. – М.: Центркаталог, 2018. – 144 с.
8. Харченко А.О. Патентоведение и изобретательство. Практикум / А.О. Харченко, А.Г. Карлов, А.А. Харченко, К.Н. Осипов. – М.: Центркаталог, 2018. – 112 с.
9. А.с. 1191214 SU Устройство для нарезания резьбы / Ф.Н. Канареев, А.О. Харченко. // Бюл. Открытия. Изобретения. –1985. – №42.
10. А.с. 872080 SU Метчик / Ф.Н. Канареев, А.О. Харченко. // Бюл. Открытия. Изобретения. –1981. – №38.
11. А.с. 1009663 SU Метчик / Ф.Н. Канареев, А.О. Харченко. // Бюл. Открытия. Изобретения. –1983. – №13.
12. Харченко А.О. Практикум по научно-исследовательской деятельности в машиностроении / А.О. Харченко, С.М. Братан, А.А. Харченко, Е.А. Владецкая. – М.: Центркаталог, 2022. – 288 с.

**Харченко Александр Олегович**  
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь  
Кандидат технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения»  
299053, г. Севастополь,  
ул. Университетская, 33  
Тел. +7 (8692) 41-77-41-(11-50)  
E-mail: khao@list.ru

**Харченко Андрей Александрович**  
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильный транспорт»  
299053, г. Севастополь,  
ул. Университетская, 33  
Тел. +7 (8692) 54-35-70  
E-mail: a.a.kharchenko@sevsu.ru

---

A.O. KHARCHENKO, A.A. KHARCHENKO

## **PROGRESSIVE DEVICES AND TOOLS FOR SMALL THREADING IN HOLES**

**Abstract.** *The article presents the results of research in the direction of improving technological equipment for internal threading. The design of devices and tools for small-size thread processing is an urgent task, for which it is necessary to create equipment options based on a systematic approach, evaluate the effectiveness of implemented decisions, taking into account the experience gained by researchers and developers in this field. It is presented a device that intend to to increase the reliability of taps and protect them from breakage due to the maximum allowable torque. Taps with a new geometry of the teeth of the intake part allows to evenly distribute the load on the surface of the tooth during operation. In this case, the more loaded first teeth have exceptionally high cutting properties. In addition, the torsional loads on the tap are significantly reduced (up to 15%), its durability is increased (by 1.2 times), and the quality of processing is also improved due to the reduction of undercutting and breaking of the first threads.*

**Keywords:** *small thread cutting, threading head, threading device, tool protection mechanism, tap, chamfer teeth, processing quality.*

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Matveyev V.V. Narezaniye tochnykh rezb (*Precision thread cutting*) / V.V. Matveyev. – М.: Mashinostroyeniye, 1978. – 88 s.
2. Frumin Yu.L. Vysokoproizvoditelnyy rezboobrazuyushchiy instrument (*High-performance thread-forming tool*) / Yu.L. Frumin. – М.: Mashinostroyeniye, 1977. – 183 s.
3. Yakukhin V.G. Optimal'naya tekhnologiya izgotovleniya rez'b (*Optimal thread manufacturing technology*) / V.G. Yakukhin. – М.: Mashinostroyeniye, 1985. – 184 s.
4. Bratan S.M. Povysheniye tochnosti formoobra-zovaniya melkorazmernykh rezb metchikami v al'yuminiyevykh splavakh: monografiya (*Improving the accuracy of forming small-sized threads with taps in aluminum alloys*) / S.M. Bratan, F.N. Kanareyev, P.A. Novikov, A.O. Kharchenko. – М.: Vuzovskiy uchebnyk: INFRA-M, 2017. – 164 s.
5. Tapping units [Electronic resource]. URL: <https://www.hagengobel.de/en/produkte> (date of the application: 08.02.2023).
6. Kharchenko A.O. Strukturno-komponovochnyy sintez podsistem moduley dlya vnutrenney rezboobrabotki (*Structural-layout synthesis of module subsystems for internal threading*) / A.O. Kharchenko, A.A. Kharchenko // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – Orel: FGBOU VO «OGU imeni I.S. Turgeneva», 2020. № 4-2 (342).– С.85-94. DOI: 10.33979/2073-7408-2020-342-4-2-85-94.
7. Kharchenko A.O. Analiz i sintez struktur sovremennykh mnogooperatsionnykh stankov: praktikum (*Analysis and synthesis of the structures of modern multioperational machines: practical*) / A.O. Kharchenko, S.M. Bratan, Ye.A. Vladetskaya, S.I. Roshchupkin. – М.: Tsentrkatolog, 2018. – 144 s.

8. Kharchenko A.O. Patentovedeniye i izobretatelstvo. Praktikum (*Patenting and invention. Workshop*) / A.O. Kharchenko, A.G. Karlov, A.A. Kharchenko, K.N. Osipov. – М.: Tsentrkatalog, 2018. – 112 s.
9. A.s. 1191214 SU Ustroystvo dlya narezaniya rezby (*Device for threading*) / F.N. Kanareyev, A.O. Kharchenko. // Byul. Otkrytiya. Izobreteniya. –1985. – №42.
10. A.s. 872080 SU Metchik (*Tap*) / F.N. Kanareyev, A.O. Kharchenko. // Byul. Otkrytiya. Izobreteniya. –1981. – №38.
11. A.s. 1009663 SU Metchik (*Tap*) / F.N. Kanareyev, A.O. Kharchenko. // Byul. Otkrytiya. Izobreteniya. – 1983. – №13.
12. Kharchenko A.O. Praktikum po nauchno-issledovatel'skoy deyatel'nosti v mashinostroyenii (*Workshop on research activities in mechanical engineering*) / A.O. Kharchenko, S.M. Bratan, A.A. Kharchenko, Ye.A. Vladetskaya. – М.: Tsentrkatalog, 2022. – 288 s.

**Kharchenko Alexander Olegovich**

"Sevastopol State University", Sevastopol  
PhD, Professor of the department "Technology of Mechanical Engineering"  
299053, Sevastopol, Universitetskaya St., 33  
Tel. +7 (8692) 41-77-41-(11-50)  
E-mail: khao@list.ru

**Kharchenko Andrey Aleksandrovich**

"Sevastopol State University", Sevastopol  
PhD, Associate Professor of the department "Automobile Transport"  
299053, Sevastopol, Universitetskaya St., 33  
Tel. +7 (8692) 54-35-70  
E-mail: a.a.kharchenko@sevsu.ru

© А.О. Харченко, А.А. Харченко, 2023

УДК 621.1.016

DOI: 10.33979/2073-7408-2023-358-2-42-47

Г.В. ГОГОЛЕВ

## МЕТОД СРАВНЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ И МАССОГАБАРИТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ЭНЕРГЕТИКЕ И МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

**Аннотация.** В статье рассмотрен метод сравнения эффективности и массогабаритных показателей теплообменников различного назначения, которые используются в машиностроительных технологиях и оборудовании механической, физико-технической обработки и в энергетике. Дана сравнительная оценка надежности теплообменников на основе тепловых труб по сравнению с другими теплообменными аппаратами.

**Ключевые слова:** массогабаритные показатели, теплообменные аппараты, теплообменники на основе тепловых труб, непрерывные технологические процессы, методы сравнения эффективности, оценка безотказности работы, тепловые трубы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. P. D. Dunn Heat Pipes / P.D. Dunn, D.A. Reay. – Pergamon Press Oxford, New York, Toronto, Sydney, Paris, 1976
2. Sugawara I., Asahi Y. Application of heat pipe to desau heat removal system in next generation reactors/ Prog. 7<sup>th</sup> Int. heat pipe conf. – Minsk, 1990. – 22p
3. Безродный М.К. Процессы переноса в двухфазных термосифонных системах: монография / М.К. Безродный, И.Л. Пиоро, Т.О. Костюк. – К.: Факт, 2003. – 480 с.
4. А.С. № 1719864. Теплообменник / Г.В. Гоголев и др. / Заявка 09.10.89. Оpubл. 15.03.92. Бюл. № 10.
5. А.С. № 1368608. Утилизационный теплообменник / Г.В. Гоголев и др. / Заявка 08.04.86. Оpubл. 23.01.88. Бюл. № 3.
6. Левченко В.Е. О повышении надежности разграничительной стенки рекуперативного теплообменника при использовании в его конструкции тепловых труб. – Сб. Тепловые трубы: теплообмен, гидродинамика, технология. Часть 2. – Обнинск: ФЭИ, 1980. – с. 155–162.

**Гоголев Геннадий Вениаминович**

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь  
Кандидат технических наук, доцент кафедры энергоустановки морских судов и сооружений  
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33  
Тел.: +79787817383

G.V. GOGOLEV

## METHOD OF COMPARISON OF THE EFFICIENCY AND WEIGHT AND DIMENSIONAL INDICATORS OF HEAT EXCHANGERS USED IN THE POWER INDUSTRY AND MACHINE-BUILDING TECHNOLOGIES

**Abstract.** *The article considers a method for comparing the efficiency and weight and size indicators of heat exchangers for various purposes, which are used in engineering technologies and equipment for mechanical, physical and technical processing and in the energy sector. A comparative assessment of the reliability of heat exchangers based on heat pipes in comparison with other heat exchangers is given.*

**Keywords:** *weight and size indicators, heat exchangers, heat-pipe heat exchangers, continuous technological processes, methods for comparing efficiency, assessment of non-failure operation, heat pipes.*

### BIBLIOGRAPHY

1. P. D. Dunn, D. A. Reay Heat Pipes. Pergamon Press, Oxford, New York, Toronto, Sydney, Paris, 1976.
2. Sugawara I., Asahi Y. Application of heat pipe to desau heat removal system in next generation reactors/ Prog. 7<sup>th</sup> Int. heat pipe conf. – Minsk, 1990. – 22p
3. Bezrodniy M.K., Prozesy perenosa v dvuhfaznyh termosifonnyh sistemah: Monograph /M.K. Bezrodniy, I.L. Pioro, T.O. Kostyuk - K.: Fact, 2003. - 480 s.
4. A.s. № 1719864. SSSR. F 28 D 15/00. Teploobmennik [Tekst] / G.V. Gogolev i dr. (SSSR). – 4747482/06; zayavleno 09.10.89; opubl.15.03.92, Byul. 10. – s.3.
5. A.s. 1368608 SSSR. F 28 D 15/02. Teploobmennik [Tekst] / G.V. Gogolev i dr. (SSSR). – 4049507/24-06; zayavleno 08.04.86; opubl.21.01.88, Byul. 03. – s.3.
6. Levchenko V.E. O povishenii nadezhnosti razgranichitelnoy stenki rekuperativnogo teploobmennika pri ispolzovanii v ego konstrukzii teplovyh trub. – Sb. Teploye trubye: teploobmen, gidrodinamika, tehnologiya. Chast 2. – Obninsk: FEI, 1980. – s. 155–162.

#### Gogolev Gennadiy Veniaminovich

Sevastopol State University

PhD, Associate Professor of the Department «Ship power plants and structures»,

299053, Sevastopol, Universitetskaya, 33

Tel.: +79787817383

E-mail: ggogolevsgu@mail.ru

© Г.В. Гоголев, 2023

УДК 621.794

DOI: 10.33979/2073-7408-2023-358-2-48-59

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

## ИССЛЕДОВАНИЯ ДИСЛОКАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ ЛОПАТОК ТУРБИН АВИАЦИОННЫХ ГТД В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

**Аннотация.** *Проведены исследования структурных изменений в сплавах лопаток турбин в процессе эксплуатации. Структурной особенностью исследованного сплава являются крупные двойники. Длительное нагружение лопатки приводит к изменениям в карбидной фазе сплава. В рамках классической струнной модели интересны исследования нелинейной динамики краевой дислокации под действием равновесной внутренней силы.*

**Ключевые слова:** *сплав, лопатка, турбина, твердый раствор, дислокация, двойник, карбидная фаза, динамика струны.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ



1. Панков В. П. Материаловедение и технология конструкционных материалов. Технологические процессы производства и ремонта летательных аппаратов и авиационных двигателей / В.П. Панков, А.Л. Бабаян, В.И. Табырца [и др.] – Краснодар, 2020.
2. Панков В. П. Исследование закономерностей формирования диффузионных покрытий на современных жаропрочных никелевых сплавах / В. П. Панков, А. Л. Бабаян, А. А. Швецов [и др.] // Ползуновский вестник. – 2020. – №1. – С. 124-129.
3. Панков В. П. Теплозащитные покрытия лопаток турбин авиационных газотурбинных двигателей / В. П. Панков, А. Л. Бабаян, М. В. Куликов, В.А. Коссои, Б.С. Варламов // Ползуновский вестник. – 2021. – № 1. – С. 161-172.
4. Давыдов Д.И. Исследование структуры двух никелевых жаропрочных сплавов после высокотемпературной деформации /Д.И. Давыдов, Н.И. Виноградова, Н.В. Казанцева, Н.Н. Степанова // Физика металлов и сплавов. – 2015. – том 116. – №2. – С. 210-218.
5. Ковалев В.Д. Исследование лопаток турбин авиационных двигателей в процессе эксплуатации / В.Д. Ковалев, В.П. Панков, В.П. Герасимов, М.В. Степанова / Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2022. – № 2 (352). – С. 75-82.
6. Ковалев В.Д. Жаростойкие покрытия лопаток турбин авиационных газотурбинных двигателей / В.Д. Ковалев, В.П. Панков, С.Ю. Радченко, В.П. Герасимов / Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2022. – № 5 (355). – С. 16-27.
7. Кузнецов В.П. Структура и свойства монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов / В.П. Кузнецов, В.П. Лесников, Н.А. Попов / – Екатеринбург, УФУ, 2016.
8. Борц Б.В. Нелинейная динамика краевых дислокаций во внешних полях и их вклад в формирование границы соединения металлов в твердой фазе при прокатке в вакууме/ Б.В. Борц, И.М. Неклюдов, С.Ф. Скоромная, В.И. Ткаченко /Физика и химия обработки материалов. – 2012. – № 3. – С. 61-69.
9. Панков В. П. Исследование закономерностей формирования диффузионных покрытий, нанесенных хромоалитированием в вакууме / В.П. Панков, И.С. Арустамова, М.В. Степанова [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2020. – Т. 16. – № 10 (190). – С. 460-467.
10. Панков В. П. Теплозащитные покрытия лопаток турбин авиационных газотурбинных двигателей / В.П. Панков, С.В. Румянцев, В.Д. Ковалев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2021. – Т. 17. – № 11 (203). – С. 483-490.

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

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

**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: sur@ostu.ru

**Фурсина Ангелина Борисовна**  
 Кандидат химических наук, доцент  
 Доцент кафедры  
 общеобразовательных дисциплин  
 Краснодарского ВВАУЛ  
 355017, г. Краснодар, ул.  
 Дзержинского, 135  
 Тел. 8(918)455-80-98  
 E-mail: fursina74@mail.ru

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

V.D. KOVALEV, V.P. PANKOV, S.Y. RADCHENKO, A.B. FURSINA, M.V. STEPANOVA

## STUDIES OF THE DISLOCATION STRUCTURE OF TURBINE BLADES OF AVIATION GAS TURBINE ENGINES DURING OPERATION

**Abstract.** *Studies of structural changes in the alloys of turbine blades during operation have been carried out. The structural feature of the investigated alloy is large twins. Prolonged loading of the blade leads to changes in the carbide phase of the alloy. Within the framework of the classical string model, studies of the nonlinear dynamics of the edge dislocation under the action of an equilibrium internal force are interesting.*

**Keywords:** alloy, blade, turbine, solid solution, dislocation, twin, carbide phase, string dynamics.

## BIBLIOGRAPHY

1. Pankov V. P Materials science and technology of structural materials. Technological processes of production and repair of aircraft and aircraft engines / V.P. Pankov, A.L. Babayan, V.I. Tabyrcha [et al.] – Krasnodar, 2020.
2. Pankov V. P. Investigation of the regularities of the formation of diffusion coatings on modern heat-resistant nickel alloys / V.P. Pankov, A.L. Babayan, A.A. Shvetsov [et al.] // Polzunovsky Bulletin. – 2020. – No. 1. – Pp.124-129.
3. Pankov V. Thermal protective coatings of turbine blades of aviation gas turbine engines / V.P. Pankov, A.L. Babayan, M.V. Kulikov, V.A. Kossoy, B.S. Varlamov // Polzunovsky vestnik. – 2021. – No. 1. – Pp. 161-172.
4. Davydov D.I. Investigation of the structure of two nickel heat-resistant alloys after high-temperature deformation / D.I. Davydov, N.I. Vinogradova, N.V. Kazantseva, N.N. Stepanova // Physics of metals and alloys. – 2015. – volume 116. – No.2. – Pp.210-218.
5. Kovalev V.D. Investigation of turbine blades of aircraft engines in operation / V.D. Kovalev, V.P. Pankov, V.P. Gerasimov, M.V. Stepanova / Fundamental and applied problems of engineering and technology. – 2022. – № 2 (352). – Pp.75-82.
6. Kovalev V.D. Heat-resistant coatings of turbine blades of aviation gas turbine engines / V.D. Kovalev, V.P. Pankov, S.Y. Radchenko, V.P. Gerasimov / Fundamental and applied problems of engineering and technology. – 2022. – № 5 (355). – Pp.16-27.
7. Kuznetsov V.P. Structure and properties of monocrystalline heat-resistant nickel alloys / V.P. Kuznetsov, V.P. Lesnikov, N.A. Popov / – Yekaterinburg, Ufa, 2016.
8. Bortz B.V. Nonlinear dynamics of edge dislocations in external fields and their contribution to the formation of the boundary of metal compounds in the solid phase during rolling in in vacuum / B.V. Bortz, I.M. Neklyudov, S.F. Skoromnaya, V.I. Tkachenko / Physics and chemistry of materials processing. – 2012. – No. 3. – Pp.61-69.
9. Pankov V. P. Investigation of the regularities of the formation of diffusion coatings deposited by chromoalitising in vacuum / V.P. Pankov, I.S. Arustamova, M.V. Stepanova [et al.] // Hardening technologies and coatings. – 2020. – T. 16. – № 10 (190). – Pp. 460-467.
10. Pankov V. P. Heat-protective coatings of turbine blades of aviation gas turbine engines / V.P. Pankov, S.V. Rummyantsev, V.D. Kovalev // Hardening technologies and coatings. – 2021. – Vol.17. – No. 11 (203). – Pp. 483-490.

**Kovalev Vyacheslav Danilovich**

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

**Pankov Vladimir Petrovich**

Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor  
Professor of Krasnodar VVAUL  
350090, Krasnodar,  
Dzerzhinskogo str.. 135  
Tel. 8(918)861-09-36  
E-mail: pankowp61@list.ru

**Radchenko Sergey Yurievich**

«Orel State University», Orel  
Doctor of Technical Sciences,  
Professor, Vice-Rector  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: sur@ostu.ru

**Fursina Angelina Borisovna**

Candidate of Chemical Sciences,  
Associate Professor, Associate Professor  
of the Department of General Education  
Disciplines of Krasnodar VVAUL  
350090, Krasnodar, Dzerzhinskiy str., 135  
Tel. 8(918)455-80-98  
E-mail: fursina74@mail.ru

**Stepanova Marina Valeryevna**

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

© В.Д. Ковалев, В.П. Панков, С.Ю. Радченко, А.Б.Фурсина, М.В. Степанова, 2023

УДК 658.512.011.56

DOI: 10.33979/2073-7408-2023-358-2-60-68

А.В. НЕМЕНКО, М.М. НИКИТИН

## УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ПОЛИРОВАНИЕМ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ

**Аннотация.** Предложен алгоритм управления финишной обработкой поверхностей вращения на основании дальнего прогноза получаемого результата при сохранении текущего режима обработки. Для прогноза используется последовательность измеренных значений контрольного параметра, которой ставится в соответствие стохастическое дифференциальное уравнение. Преимуществом метода является

формализация интегрирования полученного уравнения и построение его асимптотики, что позволяет на ранних стадиях обработки вычислить предельное значение по каждому из параметров изделия и внести корректирующее воздействие. В качестве контрольных параметров могут применяться характеристики распределения точечных и линейных дефектов по обрабатываемой поверхности, а также другие величины. Параметры рабочего процесса, на которые предлагается влиять в процессе обработки, включают кинематику взаимного перемещения инструмента и изделия, температурный режим, характеристики подачи абразива и смазочно-охлаждающей жидкости.

**Ключевые слова:** финишная обработка, дальний прогноз, стохастическое дифференциальное уравнение, временной ряд, асимптотика, управление параметрами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dilworth D. Lens Design: Automatic and quasi-autonomous computational methods and techniques – IOP Publishing Ltd, 2018. – 526 p.
2. Глущенко А.Г. Оптическое материаловедение. Материалы и технологии оптических элементов/А.Г. Глущенко, Е.П. Глущенко, Г.Н. Гончарова, С.В. Жуков – Самара: Изд-во ПГУТИ, 2017. — 200 с.
3. Козерук А. С. Анализ кинематики контакта инструмента и заготовки при обработке линз/ А. С. Козерук, Д. Л. Мальпика, А. А. Сухоцкий, В. И. Юринок, М. И. Филонова, В. И. Шамкалович //Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2020. – Т. 64. – №. 4. – С. 429-437.
4. Эйлин Н. Практический анализ временных рядов: прогнозирование со статистикой и машинное обучение /Н. Эйлин – СПб.: Диалектика, 2021. – 544 с.
5. Carrell J.B. Groups, Matrices, and Vector Spaces: A Group Theoretic Approach to Linear Algebra – Springer Science+Business Media LLC, 2017. – 414 p.
6. Anton N., Kaul A. Elementary Linear Algebra, 12th ed. – Willey, 2020. – 611 p.
7. Bourchtein L., Bourchtein A. Theory of Infinite Sequences and Series – Basel: Birkhäuser, 2021. – 388 p.
8. He T.-X. Methods for the Summation of Series – New York: Chapman and Hall/CRC, 2022. – 458 p.
9. Неменко А.В. Прогнозная оценка технического состояния сложной механической системы/А.В. Неменко, М.М. Никитин//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2021, №1(345),с.39 - 54.
10. Неменко А.В. Дальний прогноз эксплуатационной надежности производственной системы/А.В. Неменко, М.М. Никитин//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2022, №4(354),с.58 - 64.
11. Неменко А.В. Критериальная оценка отсутствия трещин в нагруженном вращающемся объекте. А.В. Неменко, М.М. Никитин//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2021,№6(350),С. 186-193
12. Неменко А.В. Управление финишной обработкой криволинейной поверхности по критерию геометрического соответствия/А.В. Неменко, М.М. Никитин//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2019, №4-1(336),с.191 - 196.
13. Неменко А.В. Применение упругих деформаций к формообразованию параболического зеркала/А.В. Неменко, М.М. Никитин//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2020, №3(341),С.11 – 19.
14. Неменко А.В. Управление процессом получения поверхностей второго порядка при финишной обработке/А.В. Неменко, М.М. Никитин//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2020, №4(342),С.52 – 58.
15. Неменко А.В. Линейная реконструкция положения контролируемого объекта/А.В. Неменко, М.М. Никитин//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2020, №4-2(342), С.136 – 140.
16. Неменко А.В. Оптимизация временных характеристик процессов финишной обработки/А.В. Неменко, М.М. Никитин//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2021,№1(345),С. 34-38.
17. Неменко А.В. Построение оптимального технического обслуживания технологической линии/А.В. Неменко, М.М. Никитин//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2021,№2(346),С. 42-50.
18. Неменко А.В. Оценка нагрузочной способности слабого звена сложной механической системы/А.В. Неменко, М.М. Никитин//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2021, №2(346),С. 51-57.
19. Неменко А.В. Предотвращение технологической усталости при финишной обработке детали/А.В. Неменко, М.М. Никитин//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2021,№3(347),С. 49-56.
20. Неменко А.В. Компенсация упругих перемещений при механической обработке детали / А.В. Неменко, М.М. Никитин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2021,№3(347),С. 73-77.

### Неменко Александра Васильевна

ФГАОУ «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Цифровое проектирование»  
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33  
Тел. +79788330519  
E-mail: valesan@list.ru

### Никитин Михаил Михайлович

ФГАОУ «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь  
Старший преподаватель кафедры «Высшая математика»  
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33  
Тел. +79788150316  
E-mail: m.nikitin.1979@gmail.com

## PARAMETERS MANAGEMENT OF ROTATION SURFACES FINISHING BY POLISHING

**Abstract.** *An algorithm for controlling the finishing treatment of surfaces of rotation based on a long-range forecast of the result obtained while maintaining the current processing mode is proposed. For prediction, a sequence of measured values of the control parameter is used, which is associated with a stochastic differential equation. The advantage of the method is the formalization of the integration of the resulting equation and the construction of its asymptotics, which allows, at the early stages of processing, to calculate the limit value for each of the parameters of the product and make a corrective action. The integral characteristics of the residual error, as well as the distribution measures of point and line defects, can be used as surface parameters. The parameters of the workflow, which are proposed to be influenced during processing, include the kinematics of the mutual movement of the tool and the product, the temperature regime, the characteristics of the supply of abrasive and cutting fluid.*

**Keywords:** *finishing, long-range forecast, stochastic differential equation, time series, asymptotics, parameter control.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Dilworth D. Lens Design: Automatic and quasi-autonomous computational methods and techniques – IOP Publishing Ltd, 2018. – 526 p.
2. Glushhenko A.G. Opticheskoe materialovedenie. Materialy i tehnologii opticheskikh jelementov/A.G. Glushhenko, E.P. Glushhenko, G.N. Goncharova, S.V.Zhukov – Samara: Izd-vo PGUTI, 2017. — 200 s.
3. Kozeruk A. S. Analiz kinematiki kontakta instrumenta i zagotovki pri obrabotke linz/ A. S. Kozeruk, D. L. Malpika, A. A. Suhockij, V. I. Jurinok, M. I. Filonova, V. I. Shamkalovich //Izvestija Nacionalnoj akademii nauk Belarusi. Serija fiziko-tehnicheskikh nauk. – 2020. – T. 64. – №. 4. – S. 429-437.
4. Jejlina N. Prakticheskij analiz vremennyh rjadov: prognozirovanie so statistikoj i mashinnoe obuchenie /N. Jejlina – Spb.: Dialektika, 2021. – 544 s.
5. Carrell J.B. Groups, Matrices, and Vector Spaces: A Group Theoretic Approach to Linear Algebra – Springer Science+Business Media LLC, 2017. – 414 p.
6. Anton H., Kaul A. Elementary Linear Algebra, 12th ed. – Willey, 2020. – 611 p.
7. Bourchtein L., Bourchtein A. Theory of Infinite Sequences and Series – Basel: Birkhäuser, 2021. – 388 p.
8. He T.-X. Methods for the Summation of Series – New York: Chapman and Hall/CRC, 2022. – 458 p.
9. Nemenko A.V. Prognoznaja ocenka tehničeskogo sostojanija slozhnoj mehanicheskoj sistemy/A.V. Nemenko, M.M. Nikitin//Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii, 2021, №1(345),s.39 - 54.
10. Nemenko A.V. Dalnij prognoz jekspluatacionnoj nadezhnosti proizvodstvennoj sistemy/A.V. Nemenko, M.M. Nikitin//Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii, 2022, №4(354),s.58 - 64.
11. Nemenko A.V. Kriterialnaja ocenka otsutstvija treshhin v nagruzhennom vrashhajushhemsja ob#ekte A.V. Nemenko, M.M. Nikitin//Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii, 2021,№6(350),S. 186-193
12. Nemenko A.V.Upravlenie finishnoj obrabotkoj krivolinejnoj poverhnosti po kriteriju geometricheskogo sootvetstvija/A.V. Nemenko, M.M. Nikitin//Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii, 2019, №4-1(336),s.191 - 196.
13. Nemenko A.V. Primenenie uprugih deformacij k formoobrazovaniju parabolicheskogo zerkala/A.V. Nemenko, M.M. Nikitin//Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii, 2020, №3(341),S.11 – 19.
14. Nemenko A.V. Upravlenie processom poluchenija poverhnostej vtorogo porjadka pri finishnoj obrabotke/A.V. Nemenko, M.M. Nikitin//Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii, 2020, №4(342),S.52 – 58.
15. Nemenko A.V. Linejnaja rekonstrukcija polozhenija kontroliruemogo ob#ekta/A.V. Nemenko, M.M. Nikitin//Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii, 2020, №4-2(342), S.136 – 140.
16. Nemenko A.V. Optimizacija vremennyh karakteristik processov finishnoj obrabotki/A.V. Nemenko, M.M. Nikitin//Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii, 2021,№1(345),S. 34-38.
17. Nemenko A.V. Postroenie optimalnogo tehničeskogo obsluzhivaniya tehnologicheskoy linii/A.V. Nemenko, M.M. Nikitin//Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii, 2021,№2(346),S. 42-50.
18. Nemenko A.V. Ocenka nagruzochnoj sposobnosti slabogo zvena slozhnoj mehanicheskoj sistemy/A.V. Nemenko, M.M. Nikitin//Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii, 2021, №2(346),S. 51-57.
19. Nemenko A.V. Predotvrashhenie tehnologicheskoy ustalosti pri finishnoj obrabotke detali/A.V. Nemenko, M.M. Nikitin//Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii, 2021,№3(347),S. 49-56.
20. Nemenko A.V. Kompensacija uprugih peremeshhenij pri mehanicheskoj obrabotke detali / A.V. Nemenko, M.M. Nikitin // Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii, 2021,№3(347),S. 73-77.

#### Nemenko Alexandra Vasilyevna

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

#### Nikitin Mikhail Mikhailovich

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

УДК 621.9.047

DOI: 10.33979/2073-7408-2023-358-2-69-73

Е.В. СМОЛЕНЦЕВ, М.В. КОНДРАТЬЕВ, В.Г. ГРИЦЮК, С.В. КОВАЛЕВ

## ОПТИМИЗИЦИЯ ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБРАБОТКИ КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

**Аннотация.** В статье описаны особенности проектирования комбинированного процесса обработки с использованием электромагнитных полей на основе исследованной ранее методологии. Приведены достоинства такого подхода к проектированию новых методов обработки деталей в машиностроении, что подтверждено теоретическими расчетами и результатами практического использования нового способа обработки отверстий.

**Ключевые слова:** электроэрозионная обработка, электрохимическая обработка, методология, производительность.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комбинированные методы обработки / В.П. Смоленцев, А.И. Болдырев, А.В. Кузовкин, Г.П. Смоленцев, А.И. Часовских. Воронеж: ВГТУ, 1996. 168 с.
2. Состояние и перспективы развития комбинированных методов обработки / Смоленцев В.П., Смоленцев Е.В. // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2017. № 2 (41). С. 5-9.
3. Справочник технолога (справочное издание) / под. ред. Сулова А.Г. // М.: Инновационное машиностроение, 2019. 800 с.
4. Эмпирическое моделирование межэлектродного при электроэрозионной обработке стали 38Х2Н2МА / Т.Н. Абляз, Е.С. Шлыков, Д.А. Борисов, А.А. Шумков, И.Ю. Летягин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. - 2017. - Т. 19, № 2. - С. 67-79.
5. Куц В.В. Исследование процесса получения отверстий полым электродом на модернизированном электроэрозионном станке ЧПУ / В.В. Куц, М.С. Разумов, Д.А. Зубков, А.С. Бышкин, А.А. Неструев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 3. С. 395-402.
6. Science-based technologies creation based on combined processing methods for fabrication aerospace filters / А.Yu. Ryazantsev, А.А. Shirokzhukhova, V.G. Gritsyuk // Materials Today: Proceedings, 19 (2019), 2065-2067 DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.075
7. Micro electrical discharge machining single discharge temperature field simulation / Z.L. Peng, Y.N. Li, D. Fang, Y.Y. Zhang. - USA: JCPRC5, 2013. - P. 859-864.
8. Jiajing Tang, Xiaodong Yang. A Thermo-hydraulic Modeling for the Formation Process of the Discharge Crater in EDM // 18th CIRP Conference ISEM XVIII. - 2016. - № 42. - P. 685-690.
9. Obara H. Detection of Discharging Position on WEDM // Proceedings of 10th ISEM, 1992 - p. 404-409.
10. Абляз, Т.Р., Борисов Д.А., Шлыков Е.С. Моделирование процесса формирования единичной лунки при электроэрозионной обработке // СТИН. - 2018. - № 2. - С. 27-31.

#### **Смоленцев Евгений Владиславович**

Воронежский государственный технический университет, д.т.н., профессор кафедры технологии машиностроения, г. Воронеж,  
ул. Плехановская, 11. +7473-2530973  
e-mail: smolentsev.rabota@gmail.com

#### **Кондратьев Михаил Вячеславович**

Воронежский государственный технический университет, к.т.н., доцент кафедры технологии машиностроения, г. Воронеж,  
ул. Плехановская, 11. +7473-2530973  
e-mail: 540520@mail.ru

#### **Грицюк Василий Григорьевич**

Воронежский государственный технический университет, к.т.н., Заведующий кафедрой технологии машиностроения, г. Воронеж, ул. Плехановская, 11. +7473-2530973  
e-mail: vgtukaftm@ya.ru

#### **Ковалев Сергей Викторович**

АО «Конструкторское бюро химвавтоматики», к.т.н., директор, г. Воронеж, ул. Ворошилова, 20. +7 (473) 234-65-65  
e-mail: vgtukaftm@ya.ru

E.V. SMOLENTSEV, M.V. KONDRATEV, V.G. GRITSYUK, S.V. KOVALEV

## OPTIMIZATION OF PROCESSING DESIGN BY COMBINED METHODS

**Abstract.** *The article describes the features of designing a combined processing process using electromagnetic fields based on the methodology previously studied. The advantages of this approach to the design of new methods of machining parts in mechanical engineering are given, which is confirmed by theoretical calculations and the results of practical use of a new method of machining holes.*

**Keywords:** *electroerosion treatment, electrochemical treatment, methodology, productivity.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Combined processing methods / V.P. Smolentsev, A.I. Boldyrev, A.V. Kuzovkin, G.P. Smolentsev, A.I. Chasovskikh. Voronezh: VSTU, 1996. 168 p.
2. State and prospects of development of combined processing methods / Smolentsev V.P., Smolentsev E.V. // Bulletin of the Rybinsk State Aviation Technological Academy named after P.A. Solovyov. 2017. No. 2 (41). pp. 5-9.
3. Technologists Handbook (reference edition) / ed. Suslova A.G. // M.: Innovative mechanical engineering, 2019. 800 p.
4. Empirical modeling of interelectrode flow during electroerosion treatment of 38X2N2MA steel / T.N., Balyas, E.S. Shlykov, D.A. Borisov, A.A. Shumkov, I.Yu. // Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanical engineering, materials science. - 2017. - Vol. 19, No. 2. - pp. 67-79.
5. Kutz V.V. Investigation of the process of obtaining holes with a hollow electrode on a modernized electroerosion CNC machine / V.V. Kutz, M.S. Razumov, D.A. Zubkov, A.S. Byshkin, A.A. Nestruev // Izvestiya Tula State University. Technical sciences. 2020. No. 3. pp. 395-402.
6. Science-based technologies creation based on combined processing methods for fabrication aerospace filters / A.Yu. Ryazantsev, A.A. Shirokzhukhova, V.G. Gritsyuk // Materials Today: Proceedings, 19 (2019), 2065-2067 DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.075
7. Micro electrical discharge machining single discharge temperature field simulation / Z.L. Peng, Y.N. Li, D. Fang, Y.Y. Zhang. - USA: JCPRC5, 2013. - P. 859-864.
8. Jiaping Tang, Xiaodong Yang. A Thermo-hydraulic Modeling for the Formation Process of the Discharge Crater in EDM // 18th CIRP Conference ISEM XVIII. - 2016. - № 42. - P. 685-690.
9. Obara H. Detection of Discharging Position on WEDM // Proceedings of 10th ISEM, 1992 - p. 404-409.
10. Ablyaz, T.P., Borisov D.A., Shlykov E.C. Modeling of the formation of a single well during electroerosion treatment // STIN. - 2018. - No. 2. - pp. 27-31.

#### **Smolentsev Evgeniy Vladislavovich**

Voronezh State Technical University,  
Doctor of Tech. Sc., professor, department «Engineering Technology», Voronezh, Plekhanovskaya str., 11 +7473-2530973  
e-mail: smolentsev.rabota@gmail.com

#### **Gritsyuk Vasily Grigorievich**

Voronezh State Technical University,  
head of the department «Engineering Technology», cand. of Tech. Sc., Voronezh Plekhanovskaya str., 11 +7473-2530973  
e-mail: vgtukaftm@ya.ru

#### **Kondratiev Mikhail Vyacheslavovich**

Voronezh State Technical University,  
Associate Professor of the Department «Engineering Technology», cand. of Tech. Sc., Voronezh, Plekhanovskaya str., 11 +7473-2530973  
e-mail: 540520@mail.ru

#### **Kovalev Sergey Viktorovich**

JSC "Design Bureau of Chemical Automation", cand. of Tech. Sc., director, Voronezh, Voroshilova str., 20. +7 (473) 234-65-65  
e-mail: vgtukaftm@ya.ru

© Е.В. Смоленцев, М.В. Кондратьев, В.Г. Грицюк, С.В. Ковалев, 2023

УДК 539.3

DOI: 10.33979/2073-7408-2023-358-2-74-81

Л.Ю. ФРОЛЕНКОВА, В.С. ШОРКИН, Е.П. КРЫГИНА, А.И. КОНИЩЕВА

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА И АНАЛИЗА АДГЕЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ В БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОВОДАХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

**Аннотация.** В работе предложена методика расчета поверхностной энергии, энергии адгезии и относительной площади адгезионного контакта для биметаллического провода. Методика базируется на варианте модели сплошной упругой среды, в основе которого лежит предположение о многочастичном потенциальном нелокальном взаимодействии бесконечно малых частиц, составляющих среду. Параметры, определяющие используемые потенциалы нелокальных взаимодействий, выражены через известные характеристики сплошной среды – модулем Юнга, коэффициентом Пуассона (или модуль сдвига), а также характеристику нелинейности дисперсионного закона распространения акустических волн. Зависимость от температуры определяется через установленные экспериментально зависимости от нее модуля Юнга и модуля сдвига. По предложенной методике были проведены расчеты энергии адгезии и относительной площади адгезионного контакта для разных температур.

**Ключевые слова:** адгезия, нелокальное многочастичное взаимодействие, градиентная среда, поверхностная энергия, энергия адгезии, площадь адгезионного контакта.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Физический энциклопедический словарь. – М.: Сов. энциклопедия, 1960. – Т. 1. – С. 19.
- 2 Фроленкова Л.Ю. Поверхностная энергия и энергия адгезии упругих тел / Л.Ю. Фроленкова, В.С. Шоркин // Изв. РАН. МТТ. – 2017. – № 1. – С. 76 – 91.
- 3 Frolenkova L.Yu. Method of calculating the surface and adhesion energies of elastic bodies / L.Yu. Frolenkova, V.S. Shorkin // PNRPU Mechanics Bulletin. – 2013. – № 1. – P. 235 – 259.
- 4 Presnetsova V.Yu. A variant of describing adhesion interaction in the probe sample system of an atomic-force microscope / V.Yu. Presnetsova, S.N. Romashin, L.Yu. Frolenkova, V.S. Shorkin, S.I. Yakushina // Nanoscience and Technology: An International Journal. – 2018. – V. 9. – Iss. 4. – P. 299 – 323. <http://dx.doi.org/10.1615/NanoSciTechnolIntJ.2018026714>.
- 5 Фроленкова Л.Ю. Теоретическая оценка прочности слоистых материалов / Л.Ю. Фроленкова, В.С. Шоркин, С.Н. Ромашин, В.Ю. Преснецова. – Орел: ОГУ им. И. С. Тургенева, 2016. – 249 с.
- 6 Витковский И.В. Теоретическое определение характеристик прочности многослойных материалов для устройств ядерной и термоядерной техники / И.В. Витковский, А.Ю. Лешуков, С.Н. Ромашин, В.С. Шоркин // Журнал технической физики. – 2015. – Т. 85. – Вып. 12. – С. 62 – 68. <http://journals.ioffe.ru/jtf/2015/12/p62-68.pdf>. ISSN: 0044-4642.
- 7 Ромашин С.Н. Вариант связи механических и адгезионных свойств твердых материалов / С.Н. Ромашин, В.С. Шоркин // Прикладная математика и механика. – 2020. – Т. 84. – Вып. 3. – С. 387 – 404.
- 8 Шоркин В.С. Нелинейные дисперсионные свойства высокочастотных волн в градиентной теории упругости / В.С. Шоркин // Механика твердого тела. – 2011. – № 6. – С. 104 – 121.
- 9 Matyukhin S.I. Surface tension and adhesion properties of films and coatings / S.I. Matyukhin, K.Yu. Frolenkov // Information. – 2017. – V.20. – No. 8(A). – P. 5741 – 5750.
- 10 Горячева И.Г. Об одном подходе к решению задач о взаимодействии упругих тел при наличии адгезии / И.Г. Горячева, Ю.Ю. Маховская // Докл. АН. – 2004. – Т. 398. – № 3. – С. 323 – 327.
- 11 Солдатенков И.А. Контактная задача при объемном приложении сил межмолекулярного взаимодействия: функция влияния для неоднородного упругого полупространства / И.А. Солдатенков // ПММ. – 2018. – Т. 82. – Вып. 3. – С. 358 – 371.
- 12 Белов П.А., Лурье С.А. Теория идеальных адгезионных взаимодействий / П.А. Белов, С.А. Лурье // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2007. – Т. 13. – № 4. – С. 519 – 536.
- 13 Турусов Р.А. Адгезионная механика: монография. 2-е изд. / Р.А. Турусов. – Москва: НИУ МГСУ, 2015. – 232 с.
- 14 Дерягин Б.В. Адгезия твердых тел / Б.В. Дерягин, Н. А. Кротова, В. П. Смилга. – М., 1973. – 280 с.
- 15 Derjaguin B.V., Muller V.M., Toporov Y.P. Effect of contact deformations on the adhesion of particles / B.V. Derjaguin, V.M. Muller, Y.P. Toporov // Journal of Colloid and Interface Science. – 1975. – V. 67. – P. 378 – 326.
- 16 Витковский И.В. Адгезионно-диффузионное формирование многослойной стенки жидкометаллического проточного тракта бланкета термоядерного реактора / И.В. Витковский, Л.Ю. Фроленкова, В.С. Шоркин // Журнал технической физики. – 2012. – Т. 82 – № 7. – С. 117 – 122.
- 17 Витковский И.В. Теоретическая оценка несплошности адгезионного контакта многослойных элементов жидкометаллического бланкета термоядерного реактора / И.В. Витковский, А.Н. Конев, В.С. Шоркин, С.И. Якушина // Журнал технической физики. – 2007. – Т. 77. – № 6. – С. 28 – 33.
- 18 Витковский И.В. Теоретическое определение адгезионных свойств материалов для жидкометаллического бланкета термоядерного реактора / И.В. Витковский, А.Н. Конев, В.С. Шоркин // Журнал технической физики. – 2009. – Т. 79. – Вып. 2. – С. 11 – 16.

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

**Шоркин Владимир Сергеевич**  
 ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева»  
 доктор физико-математических наук, профессор,  
 профессор кафедры технической физики и  
 математики  
 Тел. +7 (960) 655-00-77

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

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

L.Yu. FROLENKOVA, V.S. SHORKIN, E.P. KRYGINA, A.I. KONISHEVA

## METHOD OF CALCULATION AND ANALYSIS OF ADHESION PROCESSES OCCURRING IN BIMETALLIC WIRES UNDER HIGH TEMPERATURES

**Abstract.** *The paper proposes a method for calculating the surface energy, adhesion energy and the relative area of the adhesive contact for a bimetallic wire. The technique is based on a variant of the model of a continuous elastic medium, which is based on the assumption of a many-particle potential non-local interaction of infinitesimal particles that make up the medium. The parameters that determine the used potentials of nonlocal interactions are expressed in terms of the known characteristics of a continuous medium - Youngs modulus, Poissons ratio (or shear modulus), as well as the characteristic of the nonlinearity of the dispersion law of acoustic wave propagation. The dependence on temperature is determined through the experimentally established dependences of Youngs modulus and shear modulus on it. The proposed method was used to calculate the adhesion energy and the relative area of the adhesive contact for different temperatures.*

**Keywords:** *adhesion, nonlocal multiparticle interaction, gradient medium, surface energy, adhesion energy, adhesive contact area.*

### BIBLIOGRAPHY

- 1 Физический энциклопедический словарь. – М.: Сов. энциклопедия, 1960. – Т. 1. – С. 19.
- 2 Frolenkova L.YU. Poverhnostnaya energiya i energiya adgezii uprugih tel / L.YU. Frolenkova, V.S. SHorkin // Izv. RAN. MTT. – 2017. – № 1. – С. 76 – 91.
- 3 Frolenkova L.Yu. Method of calculating the surface and adhesion energies of elastic bodies / L.Yu. Frolenkova, V.S. Shorkin // PNRPU Mechanics Bulletin. – 2013. – № 1. – P. 235 – 259.
- 4 Presnetsova V.Yu. A variant of describing adhesion interaction in the probe sample system of an atomic-force microscope / V.Yu. Presnetsova, S.N. Romashin, L.Yu. Frolenkova, V.S. Shorkin, S.I. Yakushina // Nanoscience and Technology: An International Journal. – 2018. – V. 9. – Iss. 4. – P. 299 – 323. <http://dx.doi.org/10.1615/NanoSciTechnolIntJ.2018026714>.
- 5 Frolenkova L.YU. Teoreticheskaya ocenka prochnosti sloistyh materialov / L.YU. Frolenkova, V.S. SHorkin, S.N. Romashin, V.YU. Presnecova. – Orel: OGU im. I. S. Turgeneva, 2016. – 249 s.
- 6 Vitkovskij I.V. Teoreticheskoe opredelenie harakteristik prochnosti mnogoslujnyh materialov dlya ustrojstv yadernoj i termoyadernoj tekhniki / I.V. Vitkovskij, A.YU. Leshukov, S.N. Romashin, V.S. SHorkin // Zhurnal tekhnicheskoy fiziki. – 2015. – T. 85. – Vyp. 12. – S. 62 – 68. <http://journals.ioffe.ru/jtf/2015/12/p62-68.pdf>. ISSN: 0044-4642.
- 7 Romashin S.N. Variant svyazi mekhanicheskikh i adgezionnyh svojstv tverdyh materialov / S.N. Romashin, V.S. SHorkin // Prikladnaya matematika i mekhanika. – 2020. – T. 84. – Vyp. 3. – S. 387 – 404.
- 8 SHorkin V.S. Nelinejnye dispersionnye svojstva vysokochastotnyh voln v gradientnoj teorii uprugosti / V.S. SHorkin // Mekhanika tverdogo tela. – 2011. – № 6. – S. 104 – 121.
- 9 Matyukhin S.I. Surface tension and adhesion properties of films and coatings / S.I. Matyukhin, K.Yu. Frolenkov // Information. – 2017. – V.20. – No. 8(A). – P. 5741 – 5750.
- 10 Goryacheva I.G. Ob odnom podhode k resheniyu zadach o vzaimodejstvii uprugih tel pri nalichii adgezii / I.G. Goryacheva, YU.YU. Mahovskaya // Dokl. AN. – 2004. – T. 398. – № 3. – S. 323 – 327.
- 11 Soldatenkov I.A. Kontaktnaya zadacha pri ob"emnom prilozhenii sil mezhmolekulyarnogo vzaimodejstviya: funkciya vliyaniya dlya neodnorodnogo uprugogo poluprostranstva / I.A. Soldatenkov // PMM. – 2018. – T. 82. – Vyp. 3. – S. 358 – 371.
- 12 Belov P.A., Lure S.A. Teoriya idealnyh adgezionnyh vzaimodejstvij / P.A. Belov, S.A. Lure // Mekhanika kompozicionnyh materialov i konstrukcij. – 2007. – T. 13. – № 4. – S. 519 – 536.
- 13 Turusov R.A. Adgezionnaya mekhanika: monografiya. 2-e izd. / R.A. Turusov. – Moskva: NIU MGSU, 2015. – 232 s.
- 14 Deryagin B.V. Adgeziya tverdyh tel / B.V. Deryagin, N. A. Krotova, V. P. Smilga. – M., 1973. – 280 s.
- 15 Derjaguin B.V., Muller V.M., Toporov Y.P. Effect of contact deformations on the adhesion of particles / B.V. Derjaguin, V.M. Muller, Y.P. Toporov // Journal of Colloid and Interface Science. – 1975. – V. 67. – P. 378 – 326.



16 Vitkovskij I.V. Adgezionno-diffuzionnoe formirovanie mnogoslojnoj stenki zhidkometallicheskogo protochnogo trakta blanketa termoyadernogo reaktora / I.V. Vitkovskij, L.YU. Frolenkova, V.S. SHorkin // ZHurnal tekhnicheskoy fiziki. – 2012. – Т. 82 – № 7. – С. 117 – 122.

17 Vitkovskij I.V. Teoreticheskaya ocenka nesploshnosti adgezionnogo kontakta mnogoslojnyh elementov zhidkometallicheskogo blanketa termoyadernogo reaktora / I.V. Vitkovskij, A.N. Konev, V.S. SHorkin, S.I. YAkushina // ZHurnal tekhnicheskoy fiziki. – 2007. – Т. 77. – № 6. – С. 28 – 33.

18 Vitkovskij I.V. Teoreticheskoe opredelenie adgezionnyh svojstv materialov dlya zhidkometallicheskogo blanketa termoyadernogo reaktora / I.V. Vitkovskij, A.N. Konev, V.S. SHorkin // ZHurnal tekhnicheskoy fiziki. – 2009. – Т. 79. – Вып. 2. – С. 11 – 16.

**Frolenkova Larisa Yuryevna**

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

**Shorkin Vladimir Sergeevich**

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

**Krygina Elizaveta Pavlovna**

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

**Konisheva Alena Igorevna**

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

© Л.Ю. Фроленкова, В.С. Шоркин, Е.П. Крыгина, А.И. Конищева, 2023

УДК 621.9.025

DOI: 10.33979/2073-7408-2023-358-2-82-89

И.С. МАКСИМОВ, В.Г. РАХЧЕЕВ, С.А. ГАЛАНСКИЙ, Т.С. МАКСИМОВА

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ  
КОМПОЗИЦИОННЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ  
И ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ РЕЛЬСОВ  
В ПРОЦЕССЕ ШЛИФОВАНИЯ**

**Аннотация.** В статье предприняты попытки описания процесса температурного взаимодействия композиционного абразивного инструмента с обрабатываемой поверхностью железнодорожного рельса. Представлены результаты моделирования процесса шлифования железнодорожных рельсов двумя видами шлифовальных кругов (цельнолитым, композиционным) в среде конечно-элементного анализа Ansys. Установлены особенности формирования температурного потока на поверхности обработанного слоя рельса и температурного состояния рабочих поверхностей абразивного инструмента. Определено влияние твердости элементов композиционных шлифовальных кругов на формируемый микрорельеф верхней части поверхности катания железнодорожных рельсов.

**Ключевые слова:** абразивный инструмент, композиционный шлифовальный круг, железнодорожный рельс, теплообмен, температурное поле, шероховатость, конечно-элементный анализ.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. ГОСТ Р 51685-2013. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия. – Москва: Стандартинформ, 2014. - 101 с.
2. Максимов, И. С. Повышение эффективности шлифования рельсов железнодорожного пути за счет применения новой конструкции шлифовальных кругов / И. С. Максимов, В. Г. Рахчеев, С. А. Галанский, Л. И. Матюшкова // В сборнике: Молодежная наука в XXI веке: традиции, инновации, векторы развития. Материалы Всероссийской научно-исследовательской конференции. 2019. - С. 38-39.
3. Оптимизация характеристик абразивного инструмента для рельсошлифовального поезда РШП-48 / Б. А. Чаплыгин, В. В. Райт, В. А. Шаламов, И. А. Филиппов // Инструмент Сибири, К 2, 2001. - С 14 - 15.
4. Рахчеев, В. Г. Способ обеспечения точности формы головки рельса при шлифовании / Н. Г. Тропанова, В. Г. Рахчеев, С. В. Кириченко // Вестник транспорта Поволжья, 2018. - № 5 (71). - С. 96-100.

5. Сипайлов, В. А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности – Москва. – 1978. - 167 с.
6. Редько, С. Г. Процессы теплообразования при шлифовании металлов. – Саратов: Изд-во СГУ, 1967. – 215 с.
7. Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. – Москва: Мир, 1979. – 392 с.
8. Спиридонов, А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. Москва: Машиностроение, 1981, - 184 с.
9. Пат. 2697542 РФ. Композиционный шлифовальный круг для торцевого шлифования / В. Г. Рахчеев, И. С. Максимов, С. А. Галанский, А. Г. Мустафин, В. В. Денисов, М. В. Прусов // Бюл. №23. - 2019.
10. Гликман, Л. А. О возникновении остаточных напряжений при шлифовании // ЖТФ. / Л. А. Гликман, В. А. 1946. - Т. XVI. - выи. 7. - С. 134 - 141.

**Рахчеев Валерий Геннадьевич**

Самарский государственный университет путей  
сообщения  
Д-р техн. наук, профессор  
443066, Россия, г. Самара, ул. Свободы, 2В,  
Тел.: +7(927)760-82-75

**Максимов Илья Сергеевич**

Самарский государственный университет путей  
сообщения  
Старший преподаватель  
443066, Россия, г. Самара, ул. Свободы, 2В  
Тел.: +7(927)694-36-53

**Галанский Сергей Анатольевич**

Самарский государственный университет путей  
сообщения  
Канд. техн. наук, доцент  
443066, Россия, г. Самара, ул. Свободы, 2В  
Тел.: +7(917)111-72-82

**Максимова Татьяна Сергеевна**

Самарский государственный университет путей  
сообщения  
Аспирантка  
443066, Россия, г. Самара, ул. Свободы, 2В  
Тел.: +7(962)546-31-48

---

I.S. MAKSIMOV, V.G. RAKHCHEEV, S.A. GALANSKIY, T.S. MAKSIMOVA

**DETERMINATION OF THE THERMODYNAMIC STATE OF COMPOSITE  
GRINDING WHEELS AND THE MACHINED RAIL SURFACE  
IN THE GRINDING PROCESS**

**Abstract:** *The paper attempts to describe the process of temperature interaction of composite abrasive tool with machined surface of railway rail. The results of rail rails grinding process modeling by two types of grinding wheels (solid and composite) in Ansys finite element analysis environment are presented. The features of temperature flux formation on the surface of machined rail layer and temperature state of working surfaces of abrasive tools are determined. Influence of composite grinding wheels elements hardness on formed micro-relief of upper part of rail rolling surface has been determined.*

**Keywords:** *abrasive tool, composite grinding wheel, railway rail, heat transfer, temperature field, roughness, finite element analysis.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. GOST R 51685-2013. Railway rails. General specifications. – Moscow: Standartinform, 2014. - 101 p.
2. Maksimov, I. S. Increasing the efficiency of grinding rails of the railway track due to the application of a new construction of grinding circles / I. S. Maksimov, V. G. Rakhcheev, S. A. Galansky, L. I. Matyushkova // In the collection: Youth science in the XXI century: traditions, innovations, vectors of development. Materials of the All-Russian Scientific Research Conference. 2019. - S. 38-39.
3. Optimization of the characteristics of the abrasive tool for the rail grinding train RSHP-48 / B. A. Chaplygn, V. V. Wright, V. A. Shalamov, I. A. Filippov // Instrument of Siberia, K 2, 2001. - S 14 - 15.
4. Rakhcheev, V. G. Method of ensuring the accuracy of the shape of the rail head during grinding / N. G. Tropanova, V. G. Rakhcheev, S. V. Kirichenko // Vestnik transport Povolzhya, 2018. - № 5 (71). - S. 96-100.
5. Sipailov, V. A. Thermal processes in grinding and surface quality control – Moscow. – 1978. - 167 p.
6. Redko, S. G. Processes of heat formation during grinding of metals. – Saratov: Izd-vo SGU, 1967. – 215 p.
7. Segerlind, L. Application of the finite element method / L. Segerlind. – Moscow: Mir, 1979. – 392 p.
8. Spiridonov, A. A. Planning an experiment in the study of technological processes. Moscow: Mechanical Engineering, 1981, - 184 p.

9. Pat. 2697542 of the Russian Federation. Compositional grinding circle for end grinding / V. G. Rakhcheev, I. S. Maksimov, S. A. Galansky, A. G. Mustafin, V. V. Denisov, M. V. Prusov // Bul. №23. - 2019.

10. Glickman, L. A. On the emergence of residual stresses at grinding // ZHTF. / L. A. Glickman, V. A. 1946. - T. XVI. - vyi. 7. - S. 134 - 141.

**Rakhcheev Valeriy Gennadevich**

Samara State University of Railway Engineering  
Dr. Techn. Ph.D., Professor  
443066, Russia, Samara, Svobody Street, 2B,  
Tel: +7(927)760-82-75

**Maksimov Ilya Sergeevich**

Samara State University of Railway Engineering  
Senior Lecturer  
443066, Russia, Samara, Svobody Str., 2B  
Tel: +7(927)694-36-53

**Galansky Sergey Anatolyevich**

Samara State University of Railway Engineering  
Cand. techn. Sciences, Associate Professor  
443066, Russia, Samara, Svobody Str., 2B  
Tel: +7(917)111-72-82

**Maksimova Tatyana Sergeevna**

Samara State University of Railway Engineering  
Graduate student  
443066, Russia, Samara, Svobody Str., 2B  
Tel: +7(962)546-31-48

© И.С. Максимов, В.Г. Рахчев, С.А. Галанский, Т.С. Максимова, 2023

УДК 621.01

DOI: 10.33979/2073-7408-2023-358-2-90-105

С.М. БРАТАН, И.А. ДЫМЧЕНКО, В.И. ГОЛОВИН, Ю.К. НОВОСЕЛОВ

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЧИСЛА ОПЕРАЦИЙ ПРИ ТОНКОМ ШЛИФОВАНИИ ВАЛКОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ И ЕЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА

**Аннотация.** В статье проведено исследование процесса тонкого шлифования валков холодной прокатки, рассмотрены закономерности определения оптимального числа операций, обеспечивающих получение шероховатости поверхности валков холодной прокатки  $Ra=0,04-0,02$  мкм с наименьшей трудоемкостью обработки детали, на основе теоретического и экспериментального изучения процесса шлифования мелкозернистыми кругами разработана методика расчета числа операций. Выполнен анализ закономерностей работы единичных абразивных зерен предложена зависимость производительности процесса тонкого шлифования от зернистости круга, припуска на шлифование, режима шлифования, размеров обрабатываемой детали и круга. Для облегчения определения производительности процесса шлифования мелкозернистыми кругами предложено использовать графический метод, построены графики и номограмма. Проведена экспериментальная проверка предложенных теоретических зависимостей и методики расчета, в среднем отклонение расчетных значений производительности от экспериментальных составляло 25%, что позволило сделать заключение о соответствии предложенной зависимости реальному процессу при шлифовании на различных режимах

**Ключевые слова:** мелкозернистые круги, шлифование, операция, показатель производительности, наименьшая трудоемкость обработки, режим шлифования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новоселов Ю.К. Выявление статического критерия для анализа процессов съема материала инструментом при суперфинишировании / Ю.К. Новоселов, С.М. Братан, И.А. Дымченко, А.С. Баталин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – Тула: Изд-во ТулГУ. 2016. – Вып. 8. – С.254–261. ISSN 2071-6168.
2. Bratan S.M. Quality improvement of manufacturing rolling mill rolls / S.I. Roshchupkin, A.O. Kharchenko, S.V. Belousov // CIS Iron and Steel Review, 2021, 22, pp. 26–31.
3. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. – Севастополь: изд-во СевНТУ, 2012. – 304 с.
4. Jurko, J.; Džurpon, M.; Panda, A.; Zajac, J. Study Influence of Plastic Deformation a New Extra Low Carbon Stainless Steels XCr17Ni7MoTiN under the Surface Finish When Drilling. Adv. Mater. Res. 2012, 538–541, 1312–1315. [CrossRef]
5. Panda, A.; Duplák, J.; Jurko, J.; Behún, M. New Experimental Expression of Durability Dependence for Ceramic Cutting Tool. Appl. Mech. Mater. 2013, 275–277, 2230–2236. [CrossRef]

6. Glazyrin, V.; Ružbarský, J.; Nikitin, Y.; Božek, P.; De Silva, W.T. Study of Dynamic Processes during the Finishing of Spherical Parts Made of Difficult-to-Machine Materials. *MM Sci. J.* 2022, 2022, 5937–5942. [CrossRef]
7. Братан С.М. Обеспечение стабильности обработки поверхностей на операциях круглого наружного шлифования с позиций системного анализа / С.М. Братан, А.О. Харченко, Д.А. Лысенко // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – Орел: ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», 2023. – №1 (357). – С. 84-94.
8. Братан С.М. Анализ и синтез системы виброизоляции шлифовального станка с учетом эксплуатационной надежности ее элементов / С.М. Братан, А.О. Харченко, Е.А. Владецкая // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2019. – Том 21, №1. – С. 35-49. doi: 10.17212/1994-6309-2019-21.1-35-49
9. Лысенко Д.А. Повышение стабильности чистового шлифования шеек валов вало-винторулевого комплекса / Д.А. Лысенко, С.М. Братан, А.О. Харченко // *Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета*. – Симферополь: РИО КИПУ, 2023. – № 1 (79). – С.232-239.
10. Hung, L.X.; Ky, L.H.; Hong, T.T.; Van Cuong, N.; Trung, D.D.; Phan, N.H.; Tung, L.A.; Vu, N.P. Optimization of Manufacturing Time in Internal Grinding. In *Proceedings of the International Conference on Engineering Research and Applications, ICERA 2019, Thai Nguyen, Vietnam, 1–2 December 2020*; pp. 557–565.
11. Bratan Sergey, Sagova Zuzana, Sága Milan, Yakimovich Boris, Kuric Ivan. New Calculation Methodology of the Operations Number of Cold Rolling Rolls Fine Grinding. *Applied Sciences*. 13. 3484. 2023. 10.3390/app13063484.
12. Братан С.М. Влияние на вероятность удаления материала относительных вибраций абразивного инструмента и заготовки при чистовом шлифовании/ С.М. Братан, А.С. Часовитина, С.И. Рошупкин, К. Гупта // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2022. – Т. 24. № 1. – С. 33-47. ISSN печатной версии: 1994-6309 ISSN печатной версии: 2073-7173
13. Головин В.И. Система мониторинга состояния инструмента в условиях серийного производства / В.И. Головин, С.Ю. Радченко // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – Орел: ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», 2020. – №4-2 (342). – С. 161-168.
14. Головин В.И. Система прогнозирования возникновения нештатных ситуаций при механической обработке на основе сверточных нейронных сетей / В.И. Головин, С.Ю. Радченко // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – Орел: ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», 2019. – №5 (337). – С. 126-133.

**Братан Сергей Михайлович**

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь  
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения»  
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33  
Тел. 54-05-57  
E-mail: serg.bratan@gmail.com

**Головин Василий Игоревич**

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь  
Кандидат технических наук, доцент, директор Политехнического института  
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33  
Тел. 54-24-04  
E-mail: golovin@mail.sevsu.ru

**Дымченко Ирина Александровна**

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь  
Соискатель кафедры «Технология машиностроения», заместитель директора Политехнического института  
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33  
Тел. 54-24-04  
E-mail: iadymchenko@mail.sevsu.ru

**Новоселов Юрий Константинович**

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь  
Доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения»  
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33  
Тел. 54-05-57  
E-mail: yknovoselov@mail.sevsu.ru

---

S.M. BRATAN, I.A. DYMCHENKO, V.I. GOLOVIN, Y.K. NOVOSELOV

**METHOD OF CALCULATION OF THE NUMBER OF OPERATIONS  
IN THE THIN GRINDING OF COLD ROLLS  
AND ITS EXPERIMENTAL VERIFICATION**

**Abstract.** *The article studies the process of fine grinding of cold rolling rolls, considers the patterns of determining the optimal number of operations that provide the surface roughness of cold rolling rolls  $Ra = 0.04-0.02 \mu m$*

with the least laborious processing of the part, based on theoretical and experimental study of the grinding process with fine-grained circles developed a method for calculating the number of operations. The analysis of the regularities of operation of single abrasive grains is carried out, the dependence of the productivity of the fine grinding process on the grain size of the wheel, the grinding allowance, the grinding mode, the dimensions of the workpiece and the wheel is proposed. To facilitate the determination of the performance of the grinding process with fine-grained wheels, it is proposed to use a graphical method, graphs and a nomogram are constructed. An experimental verification of the proposed theoretical dependencies and calculation methods was carried out, on average, the deviation of the calculated productivity values from the experimental ones was 25%, which made it possible to conclude that the proposed dependence corresponds to the real process when grinding in various modes.

**Keywords:** fine-grained wheels, grinding, operation, performance indicator, the least labor intensity of processing, grinding mode.

## BIBLIOGRAPHY

1. Novoselov Yu.K. Identification of a static criterion for the analysis of the processes of material removal by a tool during superfinishing / Yu.K. Novoselov, S.M. Bratan, I.A. Dymchenko, A.S. Batalin // Proceedings of the Tula State University. Technical science. – Tula: Publishing House of TulGU, 2016. – Vol. 8. – pp.254–261. ISSN 2071-6168.
2. Bratan S.M. Quality improvement of manufacturing rolling mill rolls / S.I. Roshchupkin, A.O. Kharchenko, S.V. Belousov // CIS Iron and Steel Review, 2021, 22, pp. 26–31.
3. Novoselov Yu.K. Dynamics of surface shaping during abrasive processing / Yu.K. Novoselov. – Sevastopol: Izd-vo SevNTU, 2012. – 304 p.
4. Jurko, J.; Džupon, M.; Panda, A.; Zajac, J. Study Influence of Plastic Deformation a New Extra Low Carbon Stainless Steels XCr17Ni7MoTiN under the Surface Finish When Drilling. Adv. Mater. Res. 2012, 538–541, 1312–1315. [CrossRef]
5. Panda, A.; Duplák, J.; Jurko, J.; Behún, M. New Experimental Expression of Durability Dependence for Ceramic Cutting Tool. Appl. Mech. Mater. 2013, 275–277, 2230–2236. [CrossRef]
6. Glazyrin, V.; Ružbarský, J.; Nikitin, Y.; Božek, P.; De Silva, W.T. Study of Dynamic Processes during the Finishing of Spherical Parts Made of Difficult-to-Machine Materials. MM Sci. J. 2022, 2022, 5937–5942. [CrossRef]
7. Bratan S.M. Ensuring the stability of surface treatment in operations of circular external grinding operations from the standpoint of system analysis / S.M. Bratan, A.O. Kharchenko, D.A. Lysenko // Fundamental and applied problems of engineering and technology. – Orel: FGBOU VO «OSU named after I.S. Turgenev», 2023. – №1 (357). – pp. 84-94.
8. Bratan S.M. Analysis and synthesis of the vibration isolation system of a grinding machine, taking into account the reliability of its elements / S.M. Bratan, A.O. Kharchenko, E.A. Vladetskaya // Processing of metals (technology, equipment, tools). 2019. – Vol. 21, №1. – pp. 35-49. doi: 10.17212/1994-6309-2019-21.1-35-49
9. Lysenko D.A. Improving the stability of fine grinding of the shaft journals of the shaft-propeller complex / D.A. Lysenko, S.M. Bratan, A.O. Kharchenko // Scientific notes of the Crimean Engineering and Pedagogical University. – Simferopol: RIO KIPU, 2023. – Vol. 1 (79). – pp. 232-239.
10. Hung, L.X.; Ky, L.H.; Hong, T.T.; Van Cuong, N.; Trung, D.D.; Phan, N.H.; Tung, L.A.; Vu, N.P. Optimization of Manufacturing Time in Internal Grinding. In Proceedings of the International Conference on Engineering Research and Applications, ICERA 2019, Thai Nguyen, Vietnam, 1–2 December 2020; pp. 557–565.
11. Bratan Sergey, Sagova Zuzana, Sága Milan, Yakimovich Boris, Kuric Ivan. New Calculation Methodology of the Operations Number of Cold Rolling Rolls Fine Grinding. Applied Sciences. 13. 3484. 2023. 10.3390/app13063484.
12. Bratan S.M. Influence on the probability of material removal of the relative vibrations of the abrasive tool and the work piece during fine grinding / S.M. Bro, A.S. Chasovitina, S.I. Roshchupkin, K. Gupta // Processing of metals (technology, equipment, tools). 2022. – T. 24. № 1. – pp. 33-47. ISSN of the printed version: 1994-6309 ISSN of the printed version: 2073-7173
13. Golovin V.I. System for monitoring the state of the tool in the conditions of serial production / V.I. Golovin, S.Yu. Radchenko // Fundamental and applied problems of engineering and technology. – Orel: FGBOU VO «OSU named after I.S. Turgenev», 2020. – No. 4-2 (342). – pp. 161-168.
14. Golovin V.I. A system for predicting the occurrence of emergency situations during mechanical processing based on convolutional neural networks / V.I. Golovin, S.Yu. Radchenko // Fundamental and applied problems of engineering and technology. – Orel: FGBOU VO «OSU named after I.S. Turgenev», 2019. – No. 5 (337). – pp. 126-133.

### Bratan Sergey Mikhaylovich

"Sevastopol State University", Sevastopol  
 Doctor of Engineering, professor, head of the  
 department "Technology of mechanical engineering"  
 299053, Sevastopol,  
 Universitetskaya St., 33

### Golovin Vasily Igorevich

"Sevastopol State University", Sevastopol  
 Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
 Director of the Polytechnic Institute"  
 299053, Sevastopol, st. University, 33  
 Тел. 54-24-04

Тел. 54-05-57  
E-mail: serg.bratan@gmail.com

E-mail: golovin@mail.sevsu.ru

**Dymchenko Irina Alexandrovna**  
"Sevastopol State University", Sevastopol  
Competitor of the Department of Mechanical  
Engineering Technology, Deputy Director of the  
Polytechnic Institute  
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33  
Тел. 54-24-04  
E-mail: iadymchenko@mail.sevsu.ru

**Novoselov Yury Konstantinovich**  
"Sevastopol State University", Sevastopol  
Doctor of Technical Sciences, Professor of the  
Department of Mechanical Engineering  
299053, Sevastopol,  
Universitetskaya St., 33  
Тел. 54-05-57  
E-mail: yknvoselov@mail.sevsu.ru

© С.М. Братан, И.А. Дымченко, В.И. Головин, Ю.К. Новоселов, 2023

## **МАШИНОВЕДЕНИЕ И МЕХАТРОНИКА**

УДК 621.822

DOI: 10.33979/2073-7408-2023-358-2-106-114

А.Ю. КОРНЕЕВ, ЛИ ШЭНБО, А.Ю. КОЛЬЦОВ, Е.В. МИЩЕНКО, Л.А. САВИН

### **РАСЧЕТ КРИВЫХ ПОДВИЖНОГО РАВНОВЕСИЯ В КОНИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКАХ ЖИДКОГО ТРЕНИЯ**

**Аннотация.** Рассмотрены особенности расчета кривых подвижного равновесия в конических подшипниках скольжения с жидкостной смазкой на основе определения полей давлений и реакций смазочного слоя. Представлены результаты численного моделирования положений устойчивого равновесия при различных параметрах подшипника. Проведен сравнительный анализ теоретических и экспериментальных данных.

**Ключевые слова:** конический подшипник жидкого трения, кривая подвижного равновесия, устойчивость движения, динамические коэффициенты, параметр подшипника, несущая способность, математическая модель, результаты эксперимента.

*Статья выполнена в рамках гранта Фуцзяньского провинциального научного фонда Китая (№ 2022J011249).*

*This project is supported by Fujian Provincial Natural Science Foundation, China (№ 2022J011249).*

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Коровчинский М.В. Теоретические основы работы подшипников скольжения. – М.: Машгиз, 1959. – 404 с.
2. Воскресенский В.А., Дьяков В.И. Расчет и проектирование опор скольжения (жидкостная смазка): Справочник. – М.: Машиностроение, 1980. – 224 с.
3. Проектирование гидростатических подшипников / Под ред. Г.Риппела (пер. с англ.). – М.: Машиностроение, 1967. – 136 с.
4. Орлов П.И. Основы конструирования: Спр.-метод. пособие / Под ред. П.Н. Учаева. – М.: Машиностроение, 1988. – Т.2. – 544 с.
5. Корнеев, А. Ю. Конические подшипники жидкостного трения: монография / А. Ю. Корнеев, Л. А. Савин, О. В. Соломин; под общ. ред. Л. А. Савина. – М.: Машиностроение-1, 2008. – 172 с.
6. Позняк Э. Л. Колебания роторов // Вибрации в технике. В 6 т. Том 3. Колебания машин, конструкций и их элементов. М.: Машиностроение, 1980. С. 130 – 189.
7. Rao J. S. Rotor dynamics comes of age // Sixth International Conference on Rotor Dynamics: Proceedings. Sydney, Australia: The University of New South Wales, 2002. V. 1. P. 15 – 26.
8. Yamamoto T., Ishida Y. Linear and nonlinear rotordynamics: A modern treatment with applications. New York, John Wiley & Sons, 2001. 326p.
9. К вопросу об устойчивости роторов на конических опорах скольжения / Корнеев А.Ю. // Материалы Международ. научно-технического симпозиума «120 лет гидродинамической теории смазки». – Орел, 2006. – С. 588 – 596.

10. Лунд. Разработка понятия динамических коэффициентов радиальных подшипников жидкостного трения // Проблемы трения и смазки. – 1987. – № 1. – С. 40 – 45.
11. Обобщение понятия динамических коэффициентов смазочного слоя на конические подшипники жидкостного трения / Корнеев А.Ю., Соломин О.В., Алехин А.В. // Материалы VI Международной научно-технической конференции «Вибрационные машины и технологии». Курск, 2003. – с.132 – 135.
12. Korneev A.Y. Dynamic Equilibrium Surfaces for Conical Fluid-Film Bearings / A.Y. Koltsov, A.Y. Korneev, L.A. Savin, Li Shengbo // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 233(1), 012041
13. Программа расчета характеристик подшипников скольжения с криогенной смазкой «Подшипник-Криоген» / Л.А. Савин, О.В. Соломин, А.Ю. Корнеев и др. // Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2000610593. – Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 7.07.2000 г.
14. Корнеев А.Ю., Ли Шенбо. Экспериментальный стенд для исследования конических опор скольжения с МР-демпфером // Материалы IV международного научного симпозиума «Ударно-вибрационные системы, машины и технологии». Орел, 2010. – С. 155 – 164.
15. Li S.B., Ao H.R., Jiang H.Y., Korneev A.Yu., Savin L.A. Steady Characteristics of the Water-Lubricated Conical Bearings [J] // Journal of Donghua University (English Edition), 2012, Vol. 29, No. 2, pp. 115 – 122.
16. Korneev, A.Yu. Lubrication Characteristics of Deep Cavity Hybrid Conical Bearing / S.B. Li, H.R. Ao, H.Y. Jiang, L. Chen, A.Yu. Korneev // Journal of Harbin Institute of Technology, 2013. – Vol. 45, No. 1. – pp. 60 – 66 (Chinese).
17. Li S.B. Study of Dynamic Characteristics of Rotor System with Metal Rubber Ring and Conical Bearing Combined Support // Dissertation for the Doctoral Degree in Engineering, Harbin Institute of Technology, China, 2012. – 119 p.
18. Корнеев, А.Ю. Особенности проекторочного расчета конических подшипников жидкостного трения / А.Ю. Корнеев, Л.А. Савин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2013. - № 3 (299). – С. 3-8.

**Корнеев Андрей Юрьевич**

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

**Ли Шэнбо (Li Shengbo)**

Институт машиностроения и автомобилестроения  
Сямыньского технологического университета  
361024, г. Сямынь, КНР, округ Джимей,  
ул. Лигонг, 600  
Кандидат технических наук, доцент кафедры  
мехатроники  
Тел. +86-133-9599-49-20  
E-mail: hit4057@xmut.edu.cn

**Кольцов Александр Юрьевич**

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
Кандидат технических наук, кафедра  
мехатроники, механики и робототехники  
Тел. 8-910-205-29-61  
E-mail: alexkolzov@gmail.com

**Мищенко Елена Владимировна**

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

**Савин Леонид Алексеевич**

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
Доктор технических наук, профессор кафедры  
мехатроники, механики и робототехники  
Тел. (4862) 41-98-85  
E-mail: savin@ostu.ru

A.YU. KORNEEV, LI SHENGBO, A. YU. KOLTISOV, E.V. MISHCHENKO, L.A. SAVIN

**THE DYNAMIC EQUILIBRIUM SURFACES CALCULATION  
IN THE LIQUID FRICTION CONICAL BEARINGS**

**Abstract.** *The dynamic equilibrium surfaces calculation in the liquid friction conical bearings on the basis of pressure fields and reactions in fluid film is considered. The results of the numerical simulation of stable balance position*

with different parameters of bearing are presented. The comparative analysis of theoretical and experimental data is carrying out.

**Keywords:** liquid friction conical bearing, dynamic equilibrium surfaces, stability of motion, dynamic coefficients, bearing parameter, load-carrying capacity, mathematical model, experimental results.

## BIBLIOGRAPHY

1. Korovchinskiy M.V. Teoreticheskiye osnovy raboty podshipnikov skolzheniya. – M.: Mashgiz, 1959. – 404 s.
2. Voskresenskiy V.A., Dyakov V.I. Raschet i proyektirovaniye opor skolzheniya (zhidkostnaya smazka): Spravochnik. – M.: Mashinostroyeniye, 1980. – 224 s.
3. Proyektirovaniye gidrostaticheskikh podshipnikov / Pod red. G.Rippela (per. s angl.). – M.: Mashinostroyeniye, 1967. – 136 s.
4. Orlov P.I. Osnovy konstruirovaniya: Spr.-metod. posobiye / Pod red. P.N. Uchayeva. – M.: Mashinostroyeniye, 1988. – T.2. – 544 s.
5. Korneyev, A. YU. Konicheskiye podshipniki zhidkostnogo treniya: monografiya / A. YU. Korneyev, L. A. Savin, O. V. Solomin; pod obshch. red. L. A. Savina. – M.: Mashinostroyeniye-1, 2008. – 172 s.
6. Poznyak E. L. Kolebaniya rotorov // Vibratsii v tekhnike. V 6 t. Tom 3. Kolebaniya mashin, konstruksiy i ikh elementov. M.: Mashinostroyeniye, 1980. S. 130 – 189.
7. Rao J. S. Rotor dynamics comes of age // Sixth International Conference on Rotor Dynamics: Proceedings. Sydney, Australia: The University of New South Wales, 2002. V. 1. P. 15 – 26.
8. Yamamoto T., Ishida Y. Linear and nonlinear rotordynamics: A modern treatment with applications. New York, John Wiley & Sons, 2001. 326p.
9. K voprosu ob ustoychivosti rotorov na konicheskikh oporakh skolzheniya / Korneyev A.YU. // Materialy Mezhdunarod. nauchno-tekhnicheskogo simpoziuma «120 let gidrodinamicheskoy teorii smazki». – Orel, 2006. – S. 588 – 596.
10. Lund. Razrabotka ponyatiya dinamicheskikh koeffitsiyentov radialnykh podshipnikov zhidkostnogo treniya // Problemy treniya i smazki. – 1987. – № 1. – S. 40 – 45.
11. Obobshcheniye ponyatiya dinamicheskikh koeffitsiyentov smazochnogo sloya na konicheskiye podshipniki zhidkostnogo treniya / Korneyev A.YU., Solomin O.V., Alekhin A.V. // Materialy VI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Vibratsionnyye mashiny i tekhnologii». Kursk, 2003. – s.132 – 135.
12. Korneev A.Y. Dynamic Equilibrium Surfaces for Conical Fluid-Film Bearings / A.Y. Koltsov, A.Y. Korneev, L.A. Savin, Li Shengbo // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 233(1), 012041
13. Programma rascheta kharakteristik podshipnikov skolzheniya s kriogennoy smazkoy «Podshipnik-Kriogen» / L.A. Savin, O.V. Solomin, A.YU. Korneyev i dr. // Svidetelstvo ob ofitsialnoy registratsii programmy dlya EVM № 2000610593. – Zareg. v Reyestre programm dlya EVM 7.07.2000 g.
14. Korneyev A.YU., Li Shenbo. Eksperimentalnyy stend dlya issledovaniya konicheskikh opor skolzheniya s MR-dempferom // Materialy IV mezhdunarodnogo nauchnogo simpoziuma «Udarno-vibratsionnyye sistemy, mashiny i tekhnologii». Orel, 2010. – S. 155 – 164.
15. Li S.B., Ao H.R., Jiang H.Y., Korneev A.Yu., Savin L.A. Steady Characteristics of the Water-Lubricated Conical Bearings [J] // Journal of Donghua University (English Edition), 2012, Vol. 29, No. 2, rr. 115 – 122.
16. Korneev, A.Yu. Lubrication Characteristics of Deep Cavity Hybrid Conical Bearing / S.B. Li, H.R. Ao, H.Y. Jiang, L. Chen, A.Yu. Korneev // Journal of Harbin Institute of Technology, 2013. – Vol. 45, No. 1. – rr. 60 – 66 (Chinese).
17. Li S.B. Study of Dynamic Characteristics of Rotor System with Metal Rubber Ring and Conical Bearing Combined Support // Dissertation for the Doctoral Degree in Engineering, Harbin Institute of Technology, China, 2012. – 119 p.
18. Korneyev, A.YU. Osobennosti proyektirovochnogo rascheta konicheskikh podshipnikov zhidkostnogo treniya / A.YU. Korneyev, L.A. Savin // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2013. - № 3 (299). – S. 3-8.

### **Korneev Andrey Yurievich**

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Oryol State University named after I.S. Turgenev"  
302030, Orel, st. Moscow, 34  
Dean of the Faculty of Secondary Professional education,  
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor  
Tel. 8-906-662-44-22  
E-mail: korneev\_andrey@mail.ru

### **Li Shengbo**

Institute of Mechanical Engineering and Automotive Industry  
Xiamen University of Technology  
361024, Xiamen, China, Jimei County,  
st. Ligong, 600  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department  
mechatronics  
Tel. +86-133-9599-49-20  
E-mail: hit4057@xmut.edu.cn

### **Koltsov Alexander Yurievich**

### **Mishchenko Elena Vladimirovna**



Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Oryol State University named after I.S. Turgenev"  
302020, Orel, Naugorskoye highway, 29  
Candidate of Technical Sciences, Department mechatronics, mechanics and robotics  
Tel. 8-910-205-29-61  
E-mail: alexkolzov@gmail.com

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Oryol State Agricultural University named after N.V. Parakhina"  
302019, Orel, st. General Rodina, 69  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department technosphere safety  
Tel. 8-953-623-22-45  
E-mail: art\_lena@inbox.ru

**Savin Leonid Alekseevich**

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Oryol State University named after I.S. Turgenev"  
302020, Orel, Naugorskoye highway, 29  
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department mechatronics, mechanics and robotics  
Tel. (4862) 41-98-85  
E-mail: savin@ostu.ru

© А.Ю. Корнеев, Ли Шэнбо, А.Ю. Кольцов, Е.В. Мищенко, Л.А. Савин, 2023

УДК 629.08

DOI: 10.33979/2073-7408-2023-358-2-115-123

А.Ю. РОДИЧЕВ, А.В. ГОРИН, И.В. РОДИЧЕВА, А.Д. СЕРЕБРЕННИКОВ, К.В. ВАСИЛЬЕВ

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА БЕСКОНТАКТНОЙ ТЕПЛОВОЙ ДИАГНОСТИКИ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ

**Аннотация.** В статье были рассмотрены методы диагностики подшипниковых узлов скольжения и способов их осуществления. На основе полученной информации был проведен эксперимент по диагностике подшипникового узла скольжения при помощи бесконтактного метода теплового контроля с последующей обработкой полученных данных при помощи сверточных нейронных сетей ResNet. В процессе проведения непрерывного эксперимента было выделено четыре различных состояния подшипникового узла скольжения на основе изображений термограмм. На основе полученных данных была обучена сверточная нейронная сеть, с последующим решением задачи классификации дефектов по данным изображений термограмм.

**Ключевые слова:** подшипниковый узел скольжения, диагностика, дефекты, искусственная нейронная сеть, сверточная нейронная сеть.

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

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Совершенствование материалов для подшипников скольжения двигателей внутреннего сгорания (обзор) / Н. П. Бурковская, Н. В. Севостьянов, Т. А. Болсуновская, И. Ю. Ефимочкин // Труды ВИАМ. – 2020. – № 1(85). – С. 78-91. – DOI 10.18577/2307-6046-2020-0-1-78-91. – EDN BVRMFV.
2. Павлов, А. П. Исследование возможности использования композитных материалов при производстве подшипников скольжения / А. П. Павлов, И. А. Шапошников // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2018. – № 1(15). – С. 3. – EDN YVDJTP.
3. Collacott, R. A.: Mechanical Fault Diagnosis and Condition Monitoring. London: Chapman and Hall 1977
4. Allianz, Handbook of Loss Prevention. Berlin: Springer 1978
5. Bloch, H. P. and Gettner, F. K.: Practical Machinery Management for Process Plants, Volume 2: Machinery Failure Analysis and Troubleshooting. Third Edition, Houston: Gulf Publishing Company 1999
6. Колпаков, В. Е. Диагностика автотракторных двигателей с использованием инфракрасной термографии / В. Е. Колпаков, Л. В. Тишкин // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2012. – № 26. – С. 369-372. – EDN PIQTVR.
7. Колпаков, В. Е. Бесконтактный метод теплового контроля автотракторных двигателей / В. Е. Колпаков // Транспортное дело России. – 2015. – № 4. – С. 130-131. – EDN UXWIQZ.

8. Вавилов, В.П. Тепловые методы неразрушающего контроля: Справочник / В.П. Вавилов. – М.: Машиностроение, 1991. – 264 с.
9. Панков, Е. А. Применение инфракрасной спектроскопии для диагностики авиационных двигателей / Е. А. Панков, Н. Ф. Чайка // . – 2017. – Т. 1. – С. 12-16. – EDN YMZJXV.
10. Панков Е.А., Чайка Н. Ф. Возможности спектральных методов для диагностики авиационных двигателей // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр.: Магистерская научная сессия «Первые шаги в науке»: сб. материалов (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск: СГУГиТ, 2016. – С. 8–13.
11. Устинов, М. А. Обзор существующих методов диагностирования электродвигателей / М. А. Устинов // Форум молодых ученых. – 2020. – № 5(45). – С. 481-486. – EDN VINYRT.
12. Feng Z, Liang M, Chu F. Recent advances in time-frequency analysis methods for machinery fault diagnosis: a review with application examples. *Mech Syst Signal Process* 2013;38 (1):165–205.
13. Li Y, Wang X, Si S, Huang S. Entropy based fault classification using the case western reserve university data: a benchmark study. *IEEE Trans Reliab* 2019. (2019-03-07) [2019-03-28]. Available from: <https://doi.org/10.1109/TR.2019.2896240>.
15. Wang Z, Du W, Wang J, Zhou J, Han X, Zhang Z, et al. Research and application of improved adaptive moment fault diagnosis method. *Measurement* 2019; 140:63–75.
16. Wang Z, He W, Du W, Zhou J, Han X, Wang J, et al. Application of parameter optimized variational mode decomposition method in fault diagnosis of gearbox. *IEEE Access* 2019; 7:44871–82.
17. Li Y, Wang X, Liu Z, Liang X, Si S. The entropy algorithm and its variants in the fault diagnosis of rotating machinery: a review. *IEEE Access* 2018; 6:66723–41.
18. Zhang C, Harne RL, Li B, Wang K. Statistical quantification of dc power generated by bistable piezoelectric energy harvesters when driven by random excitations. *J Sound Vib* 2019; 442:770–86.
19. Zhang C, Liu Y, Wan F, Chen B, Liu J, Hu B. Multi-faults diagnosis of rolling bearings via adaptive customization of flexible analytical wavelet bases. *Chinese J Aeronautics* 2019. (2019-03-25) [2019-03-28]. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2019.03.014>.
20. Li Y, Li G, Yang Y, Liang X, Xu MA. fault diagnosis scheme for planetary gearboxes using adaptive multi-scale morphology filter and modified hierarchical permutation entropy. *Mech Syst Signal Process* 2018; 105:319–37.
21. Zhao M, Lin J. Health assessment of rotating machinery using a rotary encoder. *IEEE Trans Ind Electron* 2017;65(3):2548–56.
22. Yongbo, L.I., Xiaoqiang, D.U., Fangyi, W.A.N., Xianzhi, W.A.N.G. and Huangchao, Y.U., 2020. Rotating machinery fault diagnosis based on convolutional neural network and infrared thermal imaging. *Chinese Journal of Aeronautics*, 33(2), pp.427-438.
23. Choudhary, A., Mian, T. and Fatima, S., 2021. Convolutional neural network based bearing fault diagnosis of rotating machine using thermal images. *Measurement*, 176, p.109196.
24. Shao, H., Xia, M., Han, G., Zhang, Y. and Wan, J., 2020. Intelligent fault diagnosis of rotor-bearing system under varying working conditions with modified transfer convolutional neural network and thermal images. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(5), pp.3488-3496.
25. Shao, H., Li, W., Xia, M., Zhang, Y., Shen, C., Williams, D., Kennedy, A. and de Silva, C.W., 2021. Fault diagnosis of a rotor-bearing system under variable rotating speeds using two-stage parameter transfer and infrared thermal images. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 70, pp.1-11.
26. Jia, Z., Liu, Z., Vong, C.M. and Pecht, M., 2019. A rotating machinery fault diagnosis method based on feature learning of thermal images. *Ieee Access*, 7, pp.12348-12359. Author, F.: Article title. *Journal* 2(5), 99–110 (2016).

**Родичев Алексей Юрьевич**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»,  
канд. техн. наук, доцент кафедры  
сервис и ремонт машин  
302020, г.Орёл, Московская, 77  
E-mail: rodfox@yandex.ru

**Родичева Ирина Владимировна**

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

**Васильев Кирилл Владимирович**

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

**Горин Андрей Владимирович**

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

**Серебrenников Антон Дмитриевич**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел  
студент  
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 29  
E-mail: gorin57@mail.ru

## APPLICATION OF THE METHOD OF NON-CONTACT THERMAL DIAGNOSIS OF PLAIN BEARINGS

**Abstract.** *The article considered methods for diagnosing bearing sliding units and methods for their implementation. Based on the information received, an experiment was carried out to diagnose a sliding bearing unit using a non-contact method of thermal control, followed by processing the data obtained using ResNet convolutional neural networks. In the process of conducting a continuous experiment, four different states of the sliding bearing unit were identified based on the images of thermograms. On the basis of the obtained data, a convolutional neural network was trained with the subsequent solution of the problem of classifying defects according to the image data of thermograms.*

**Keywords:** *sliding bearing unit, diagnostics, defects, artificial neural network, high-precision neural network.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Burkovskaya N. P., Sevostyanov N. V., Bolsunovskaya T. A., Efimochkin I. Yu. Improvement of materials for sliding bearings of internal combustion engines (review) // Proceedings of VIAM. - 2020. - No. 1 (85). - S. 78-91. – DOI 10.18577/2307-6046-2020-0-1-78-91. – EDN BVRMFV.
2. Pavlov, A.P., Shaposhnikov, I.A., Investigation of the possibility of using composite materials in the production of plain bearings, *Avtomobil. Road. Infrastructure.* - 2018. - No. 1 (15). - P. 3. - EDN YVDJTP.
3. Collacott, R. A.: *Mechanical Fault Diagnosis and Condition Monitoring.* London: Chapman and Hall 1977
4. Allianz, *Handbook of Loss Prevention.* Berlin: Springer 1978
5. Bloch, H. P. and Gettner, F. K.: *Practical Machinery Management for Process Plants, Volume 2: Machinery Failure Analysis and Troubleshooting.* Third Edition, Houston: Gulf Publishing Company 1999
6. Kolpakov, V. E. Diagnostics of autotractor engines using infrared thermography / V. E. Kolpakov, L. V. Tishkin // *Bulletin of the St. Petersburg State Agrarian University.* - 2012. - No. 26. - S. 369-372. – EDN PIQTVP.
7. Kolpakov, V. E. Non-contact method of thermal control of automotive engines / V. E. Kolpakov // *Transport business of Russia.* - 2015. - No. 4. - P. 130-131. – EDN UXWIQZ.
8. Vavilov V.P. *Thermal methods of non-destructive testing: a Handbook / V.P. Vavilov.* - M.: Mashinostroenie, 1991. - 264 p.
9. Pankov, E. A. Application of infrared spectroscopy for diagnostics of aircraft engines / E. A. Pankov, N. F. Chaika // - 2017. - T. 1. - S. 12-16. -EDN YMZJXV.
10. Pankov E.A., Chaika N.F. Possibilities of spectral methods for diagnostics of aircraft engines // *Interexpo GEO-Siberia-2016. XII Intern. scientific Congr.: Masters scientific session "First steps in science": Sat. materials (Novosibirsk, April 18–22, 2016).* - Novosibirsk: SGUGiT, 2016. - S. 8–13.
11. Ustinov, M. A. Review of existing methods for diagnosing electric motors / M. A. Ustinov // *Forum of Young Scientists.* - 2020. - No. 5(45). - S. 481-486. – EDN VINYRT.
12. Feng Z, Liang M, Chu F. Recent advances in time-frequency analysis methods for machinery fault diagnosis: a review with application examples. *Mech Syst Signal Process* 2013;38(1):165–205.
13. Li Y, Wang X, Si S, Huang S. Entropy based fault classification using the case western reserve university data: a benchmark study. *IEEE Trans Reliab* 2019. (2019-03-07) [2019-03-28]. Available from: <https://doi.org/10.1109/TR.2019.2896240>.
15. Wang Z, Du W, Wang J, Zhou J, Han X, Zhang Z, et al. Research and application of improved adaptive mameda fault diagnosis method. *Measurement* 2019; 140:63-75.
16. Wang Z, He W, Du W, Zhou J, Han X, Wang J, et al. Application of parameter optimized variational mode decomposition method in fault diagnosis of gearbox. *IEEE Access* 2019; 7:44871–82.
17. Li Y, Wang X, Liu Z, Liang X, Si S. The entropy algorithm and its variants in the fault diagnosis of rotating machinery: a review. *IEEE Access* 2018; 6:66723–41.
18. Zhang C, Harne RL, Li B, Wang K. Statistical quantification of dc power generated by bistable piezoelectric energy harvesters when driven by random excitations. *J Sound Vib* 2019; 442:770-86.
19. Zhang C, Liu Y, Wan F, Chen B, Liu J, Hu B. Multi-faults diagnosis of rolling bearings via adaptive customization of flexible analytical wavelet bases. *Chinese J Aeronautics* 2019. (2019-03-25) [2019-03-28]. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2019.03.014>.
20. Li Y, Li G, Yang Y, Liang X, Xu MA. fault diagnosis scheme for planetary gearboxes using adaptive multi-scale morphology filter and modified hierarchical permutation entropy. *Mech Syst Signal Process* 2018; 105:319-37.
21. Zhao M, Lin J. Health assessment of rotating machinery using a rotary encoder. *IEEE Trans Ind Electron* 2017;65(3):2548–56.
22. Yongbo, L.I., Xiaoqiang, D.U., Fangyi, W.A.N., Xianzhi, W.A.N.G. and Huangchao, Y.U., 2020. Rotating machinery fault diagnosis based on convolutional neural network and infrared thermal imaging. *Chinese Journal of Aeronautics*, 33(2), pp.427-438.
23. Choudhary, A., Mian, T. and Fatima, S., 2021. Convolutional neural network based bearing fault diagnosis of rotating machine using thermal images. *Measurement*, 176, p.109196.

24. Shao, H., Xia, M., Han, G., Zhang, Y. and Wan, J., 2020. Intelligent fault diagnosis of rotor-bearing system under varying working conditions with modified transfer convolutional neural network and thermal images. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 17(5), pp.3488-3496.

25. Shao, H., Li, W., Xia, M., Zhang, Y., Shen, C., Williams, D., Kennedy, A. and de Silva, C.W., 2021. Fault diagnosis of a rotor-bearing system under variable rotating speeds using two-stage parameter transfer and infrared thermal images. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 70, pp.1-11.

26. Jia, Z., Liu, Z., Vong, C.M. and Pecht, M., 2019. A rotating machinery fault diagnosis method based on feature learning of thermal images. Ieee Access, 7, pp.12348-12359. Author, F.: Article title. Journal 2(5), 99–110 (2016).

**Rodichev Alexey Yurievich**

Orel State University named after I.S. Turgenev  
candidate of technical Sciences, associate professor of the  
department service and repair of cars  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: rodfox@yandex.ru

**Gorin Andrei Vladimirovich**

Orel State University named after I.S. Turgenev  
candidate of technical sciences, associate professor of the  
department mechatronics, mechanics and robotics  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: gorin57@mail.ru

**Rodicheva Irina Vladimirovna**

Orel State University named after I.S. Turgenev  
graduate student  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: rodfox@yandex.ru

**Serebrennikov Artem Dmitrievich**

Orel State University named after I.S. Turgenev  
student  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: gorin57@mail.ru

**Vasiliev Kirill Vladimirovich**

Orel State University named after I.S. Turgenev  
student  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: rodfox@yandex.ru

© А.Ю. Родичев, А.В. Горин, И.В. Родичева, А.Д. Серебренников, К.В. Васильев, 2023

УДК 629.4.027.4: 656.2

DOI: 10.33979/2073-7408-2023-358-2-124-137

А.С. КОСМОДАМИАНСКИЙ, С.Н. ЗЛОБИН, О.В. ИЗМЕРОВ

## **СИНХРОННЫЕ ТЯГОВЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ В ПРИВОДАХ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЛОКОМОТИВОВ**

**Аннотация.** Рассмотрена задача перехода отечественных локомотивов на бесколлекторный тяговый привод. Предложено использовать синхронные тяговые электродвигатели с электромагнитным возбуждением, позволяющие снизить стоимость преобразователя за счет отказа от широтно-импульсной модуляции фазного напряжения и уменьшить потери в режимах частичной мощности. Установлена нецелесообразность использования в тяговом приводе локомотивов коммутации за счет противо-э.д.с. синхронной машины. Доказано, что, с учетом особенностей тяговых приводов локомотивов, синхронные двигатели по энергетическим показателям не уступают асинхронным. В качестве наиболее приоритетного направления использования синхронных двигателей предложена модернизация ранее созданных грузовых электровазозов, спроектированных для применения коллекторного привода, для повышения их тяговых свойств до уровня электровазозов с асинхронным тяговым приводом. Предложены меры по усилению узла подвешивания ТЭД. Также установлена целесообразность применения синхронных двигателей для повышения мощности эксплуатируемых пассажирских электровазозов с коллекторным приводом и предложено провести исследования для выяснения целесообразности использования синхронных двигателей для повышения надежности грузовых тепловозов с передачей переменного тока. На предложенные технические решения получен патент на изобретение и подана заявка на получение патента.

**Ключевые слова:** электрические машины, бесколлекторный тяговый привод локомотива, надежность, импортозамещение.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Курбасов, А.С. Асинхронный привод электровазозов: эффективность перевозок, технологичность производства / А.С. Курбасов // Транспорт Российской Федерации. – 2008. – № 6 (19) 2008. – С. 51-53.

2. Курбасов, А.С. Повышение работоспособности тяговых электродвигателей / А.С. Курбасов. – М.: Транспорт, 1977. – 223 с.
3. Тяговый привод локомотивов с высокомоментным коллекторным тяговым электродвигателем / О.В. Дорофеев, В.И. Воробьев, М.И. Борзенков, О.В. Измеров, С.Н. Злобин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ОГУ им. Тургенева, 2021. – № 2 (346). – С. 118-129.
4. Кибернетические аспекты методов синтеза электромеханических систем: монография / О.В. Измеров [и др.]; под ред. академика Академии электро-техн. наук Рос. Федерации, д-ра техн. наук, проф. А.С. Космодамианского. – Орел: Госуниверситет - УНПК, 2015. – 234 с.
5. Курбасов, А.С. ВНИИЖТ – в синхронном тупике. / А.С. Курбасов // Гудок. – 15.12. 2004.
6. Вентильные двигатели и их применение на электроподвижном составе / Б.Н. Тихменев, Н.Н. Горин, В.А. Кучумов, В.А. Сенаторов. – М.: Транспорт, 1976. – 280 с.
7. Стендовые испытания динамико-кинематических характеристик шарнирно-карданных муфт с разработкой основных параметров и технических требований к тяговому приводу локомотивов с опорно-рамным подвешиванием тяговых электродвигателей / Н.А. Фурьянский, А.А. Шацилло, Н.Н. Каменев, А.С. Нестрахов // Заключительный отчет по теме «Создание магистральных локомотивов большой мощности с осевыми нагрузками 25-27 т с целью повышения провозной способности железных дорог». – И-116-76, разд. 3, М.: ВНИИЖТ, 1976. – 129 с.
8. Особенности фрикционных колебаний в мономоторном тяговом приводе локомотивов / А.П. Павленко, В.П. Голубев // Вестник ВНИИЖТ. – М., 1977. – № 5. – С. 18-22.
9. Добрынин, Л.К. Уровень динамических нагрузок в трансмиссиях тепловозов с гидропередачами при боксовании / Л.К. Добрынин, В.А. Лысак, Ю.Н. Соколов // Тр. ВНИТИ. – Коломна, 1966. – Вып. 22. – С. 93-100.
10. Кучумов, В. Двигая новое, не запрещайте старое / В. Кучумов, С. Покровский // Гудок. – 28.01.2000.
11. Проектирование тяговых электрических машин / М.Д. Находкин, Г.В. Василенко, В.И. Бочаров, М.А. Козорезов. – М.: Транспорт, 1976. – 624 с.
12. Вентильные двигатели в тяговом приводе электрического подвижного состава магистральных железных дорог / Р.И. Прошутинский, О.В. Колодкин // Известия ПГУПС. – Санкт-Петербург, 2015. – № 1. – С. 51-56.
13. Модернизация колесно-моторного блока электровоза 2ЭС6 / В.И. Воробьев, О.В. Измеров, М.И. Борзенков, С.Н. Злобин, С.О. Копылов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ОГУ им. Тургенева, 2018. – № 4-1 (330). – С. 131-139.
14. Патент 2423260 Рос. Федерация, МПК В61С9/50. Подвеска тяговых электродвигателей железнодорожного транспортного средства / Г.С. Михальченко, О.В. Измеров, В.И. Воробьев, В.Г. Новиков, А.А. Пугачев, Д.В. Воробьев, А.С. Новиков, А.С. Космодамианский. – № 2009147665/11; опубли. 10.07.2011, Бюл. № 19.
15. Предложения по модернизации тягового привода пассажирских электровозов производства завода «Шкода» [Текст] + [Электронный ресурс] / В.И. Воробьев, О.В. Измеров, М.А. Маслов, С.О. Копылов // Повышение эффективности транспортных машин: сб. науч. тр. / под ред. В.И. Воробьева, В.В. Рогалева. – Брянск: БГТУ, 2017. – С. 57-73.
16. Проблемы модернизации тягового привода пассажирского тепловоза ТЭП70 / А.С. Космодамианский, В.И. Воробьев, М.Ю. Капустин, Д.Н. Шевченко, О.В. Измеров // Наука и техника транспорта. – 2020. – № 3. – С. 20-29.
17. Ивахин, А.И. Варианты реализации и динамические свойства асинхронного тягового привода локомотивов с дугостаторными электродвигателями / А.И. Ивахин // Тяжелое машиностроение. – 2012. – № 10. – С. 17-21.

**Космодамианский Андрей Сергеевич**  
 Российский университет транспорта  
 (МИИТ),  
 г. Москва  
 Доктор технических наук, профессор,  
 заведующий кафедры «Тяговый  
 подвижной состав»  
 E-mail: askosm@mail.ru

**Измеров Олег Васильевич**  
 Брянский государственный  
 технический университет, г.  
 Брянск  
 Соискатель по кафедре  
 «Подвижной состав  
 железных дорог»  
 E-mail: izmerov@yandex.ru

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

A.S. KOSMODAMIANSKIY, S.N. ZLOBIN, O.V. IZMEROV

## SYNCHRONOUS TRACTION ELECTRIC MOTORS IN DRIVES OF PERSPECTIVE LOCOMOTIVES

**Abstract.** *The problem of transition of domestic locomotives to a brushless traction drive is considered. It is proposed to use synchronous traction motors with electromagnetic excitation, which make it possible to reduce the cost of the converter due to the rejection of pulse-width modulation of the phase voltage and to reduce losses in partial power modes. The inexpediency of using switching locomotives in the traction drive due to the counter-emf synchronous machine has been established. It is proved that, taking into account the peculiarities of locomotive traction drives, synchronous motors are not inferior to asynchronous ones in terms of energy performance. As the most priority direction for the use*

*of synchronous motors, the modernization of previously created freight electric locomotives designed for the use of a collector drive is proposed to increase their traction properties to the level of electric locomotives with an asynchronous traction drive. Measures are proposed to strengthen the TED suspension unit. Also, the feasibility of using synchronous motors to increase the power of operated passenger electric locomotives with a collector drive has been established and it has been proposed to conduct research to determine the feasibility of using synchronous motors to improve the reliability of freight diesel locomotives with AC-DC transmission. A patent for an invention has been obtained for the proposed technical solutions and an application for a patent has been filed.*

**Keywords:** *electric machines, brushless locomotive traction drive, reliability, import substitution.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Kurbasov, A.S. Asinkhronnyy privod elektrovozov: effektivnost perevozok, tekhnologichnost proizvodstva / A.S. Kurbasov // Transport Rossiyskoy Federatsii. – 2008. – № 6 (19) 2008. – S. 51-53.
2. Kurbasov, A.S. Povysheniye rabotosposobnosti tyagovykh elektrodvigatelye / A.S. Kurbasov. – M.: Transport, 1977. – 223 s.
3. Tyagovyy privod lokomotivov s vysokomomentnym kollektornym tyagovym elektrodvigatelyem / O.V. Dorofeyev, V.I. Vorobyev, M.I. Borzenkov, O.V. Izmerov, S.N. Zlobin // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – Orel: OGU im. Turgenyeva, 2021. – № 2 (346). – S. 118-129.
4. Kiberneticheskiye aspekty metodov sinteza elektromekhanicheskikh sistem: monografiya / O.V. Izmerov [i dr.]; pod red. akademika Akademii elektro-tekhn. nauk Ros. Federatsii, d-ra tekhn. nauk, prof. A.S. Kosmodamianskogo. – Orel: Gosuniversitet - UNPK, 2015. – 234 s.
5. Kurbasov, A.S. VNIIZHT – v sinkhronnom tupike. / A.S. Kurbasov // Gudok. – 15.12. 2004.
6. Ventilnyye dvigateli i ikh primeneniye na elektropodvizhnom sostave / B.N. Tikhmenev, N.N. Gorin, V.A. Kuchumov, V.A. Senatorov. – M.: Transport, 1976. – 280 s.
7. Stendovyye ispytaniya dinamiko-kinemacheskikh kharakteristik sharnirno-kardannykh muft s razrabotkoy osnovnykh parametrov i tekhnicheskikh trebovaniy k tyagovomu privodu lokomotivov s oporno-ramnym podveshivaniyem tyagovykh elektrodvigatelye / N.A. Fufryanskiy, A.A. Shatsillo, N.N. Kamenev, A.S. Nestrakhov // Zaklyuchitelnyy otchet po teme «Sozdaniye magistralnykh lokomotivov bolshoy moshchnosti s osevyimi nagruzkami 25-27 t s tselyu povysheniya provoznoy sposobnosti zheleznykh dorog». – I-116-76, razd. 3, M.: VNIIZHT, 1976. – 129 s.
8. Osobennosti friktsionnykh kolebaniy v monomotornom tyagovom privode lokomotivov / A.P. Pavlenko, V.P. Golubev // Vestnik VNIIZHT. – M., 1977. – № 5. – S. 18-22.
9. Dobrynin, L.K. Uroven dinamicheskikh nagruzk v transmissiyakh teplovozov s gidroperedachami pri boksovaniy / L.K. Dobrynin, V.A. Lysak, YU.N. Sokolov // Tr. VNITI. – Kolonna, 1966. – Vyp. 22. – S. 93-100.
10. Kuchumov, V. Dvigaya novoye, ne zapreshchayte staroye / V. Kuchumov, S. Pokrovskiy // Gudok. – 28.01.2000.
11. Proyektirovaniye tyagovykh elektricheskikh mashin / M.D. Nakhodkin, G.V. Vasilenko, V.I. Bocharov, M.A. Kozorezov. – M.: Transport, 1976. – 624 s.
12. Ventilnyye dvigatelya v tyagovom privode elektricheskogo podvizhnogo sostava magistralnykh zheleznykh dorog / R.I. Proshutinskiy, O.V. Kolodkin // Izvestiya PGUPS. – Sankt-Peterburg, 2015. – № 1. – S. 51-56.
13. Modernizatsiya kolesno-motornogo bloka elektrovoza 2ES6 / V.I. Vorobyev, O.V. Izmerov, M.I. Borzenkov, S.N. Zlobin, S.O. Kopylov // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – Orel: OGU im. Turgenyeva, 2018. – № 4-1 (330). – S. 131-139.
14. Patent 2423260 Ros. Federatsiya, MPK B61C9/50. Podveska tyagovykh elektrodvigatelye zheleznodorozhnogo transportnogo sredstva / G.S. Mikhailchenko, O.V. Izmerov, V.I. Vorobyev, V.G. Novikov, A.A. Pugachev, D.V. Vorobyev, A.S. Novikov, A.S. Kosmodamianskiy. – № 2009147665/11; opubl. 10.07.2011, Byul. № 19.
15. Predlozheniya po modernizatsii tyagovogo privoda passazhirskikh elektrovozov proizvodstva zavoda «Shkoda» [Tekst] + [Elektronnyy resurs] / V.I. Vorobyev, O.V. Izmerov, M.A. Maslov, S.O. Kopylov // Povysheniye effektivnosti transportnykh mashin: sb. nauch. tr. / pod red. V.I. Vorobyeva, V.V. Rogaleva. – Bryansk: BGTU, 2017. – S. 57-73.
16. Problemy modernizatsii tyagovogo privoda passazhirskogo teplovoza TEP70 / A.S. Kosmodamianskiy, V.I. Vorobyev, M.YU. Kapustin, D.N. Shevchenko, O.V. Izmerov // Nauka i tekhnika transporta. – 2020. – № 3. – S. 20-29.
17. Ivakhin, A.I. Varianty realizatsii i dinamicheskiye svoystva asinkhronnogo tyagovogo privoda lokomotivov s dugostatornymi elektrodvigatelyami / A.I. Ivakhin // Tyazheloye mashinostroyeniye. – 2012. – № 10. – S. 17-21.

**Kosmodamianskiy Andrey Sergeevich**  
Russian University of Transport (MIIT),  
Moscow Doctor of Technical Sciences,  
Professor, Head of the Department  
«Traction rolling stock»  
E-mail: askosm@mail.ru

**Izmerov Oleg Vasilevich**  
Bryansk State Technical  
University, Bryansk  
Competitor of the Department  
«Railroad rolling stock»  
E-mail: izmerov@yandex.ru

**Zlobin Sergey Nikolaevich**  
Orel State university, Orel  
Candidate of technical sciences,  
Associate Professor at the  
Department of «Mechanical  
engineering»  
E-mail: zsn2@rambler.ru

Ю.Н. КАЗАКОВ, ХАН ЮЛЕЙ, ДЖОУ ВЕНЬЯН, Л.А. САВИН

## ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫЕ ПОДШИПНИКИ СКОЛЬЖЕНИЯ С ПРОФИЛИРОВАННЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

**Аннотация.** Рассмотрены процессы функционирования подшипников жидкостного трения в условиях упругих деформаций осей сателлитов планетарных передач. Изложены принципы профилирования опорных поверхностей гидродинамических подшипников. Разработана алгоритмическая модель и представлены результаты расчета характеристик подшипника скольжения с модифицированной поверхностью.

**Ключевые слова:** гидродинамические подшипники, оси сателлитов, ветрогенераторы, деформации, профиль поверхности, минимальный зазор, моделирование, проектирование, интегральные характеристики, момент трения, грузоподъемность.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Polinder H. Overview of and trends in wind turbine generator systems // IEEE Power and Energy Society General Meeting. 2011. P. 1–8.
2. Isidoril A., Rossi F. M., Blaabjerg F. Thermal loading and reliability of 10-MW multilevel wind power converter at different wind roughness classes // IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. 50 (1). P. 484–494.
3. С. Шанбр, Ф. Элаша, Ж. Тейшейра. Обнаружение неисправностей подшипников в коробках передач ветротурбин. Межд. конференция по диагностике, прогнозированию и контролю (SDPC), 2017
4. Г. де Каа, М. Кампа. Коробка передач в сравнении с прямым приводом - новые технологические характеристики. Croonwouter & dros, Мартен Мисверг 25, 3068AV, Роттердам, Нидерланды.
5. TAVNE P. Offshore wind turbines: Reliability, availability and maintenance. London: The Institution of Engineering and Technology, 2012.
6. WALFOD C A. Wind turbine reliability: Understanding and minimizing wind turbine operation and maintenance costs. USA: Sandia National Laboratories, 2006.
7. HANSEN A D, HANSWN L H. Wind turbine concept market penetration over 10 years (1995-2004). Wind Energy, 2007, 10(1): 81-97.
8. Л.А. Савин, О.В. Соломин Автоматизированный расчет роторных машин: монография – М.: Машиностроение-1, 2006. – 368 с.
9. Shengbo Li, Alexander Babin, Denis Shutin, Yu N Kazakov, Leonid Savin Active Hybrid Journal Bearings with Lubrication Control: Towards Machine Learning Tribology International 175(4):107805
10. Yu N Kazakov, Alexey V Kornaev, Denis Shutin, Shengbo Li, Leonid Savin Active Fluid-Film Bearing With Deep Q-Network Agent-Based Control System Journal of Tribology 144(8):1-37
11. Dynamic Lubrication Analysis Program 3.10.8297.18177 (2022/9/19 10 : 05 : 54) Издательство : Xian Jiaotong University , Light and Salt (Nanjing) Technology Co., URL : <https://gr.xjtu.edu.cn/zh/web/peishiyuan/dlap>
12. Semken R. S. Direct-drive permanent magnet generators for high-power wind turbines: Benefits and limiting factors // IET Renewable Power Generation. 2012. Vol. 6 (1). P. 1–8.
13. Zhu W. D., Wang X. F. Design, Modeling and Simulation of a Geared Infinitely Variable Transmission // Journal of Mechanical Design. 2014. Vol. 136 (7). P. 071011–071011-9.
14. Skaare B., Hörnsten B., Nielsen F. G. Modeling, simulation and control of a wind turbine with a hydraulic transmission system // Wind Energy. 2013. Vol. 16 (8). P. 1259–1276.
15. Diepeveen N. F. B. On the application of fluid power transmission in offshore wind turbines. PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft, 2013.

**Казакوف Юрий Николаевич**

магистр кафедры мехатроники, механики и робототехники, Орел, Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева  
nastepanin02@mail.ru

**Джоу Веньян**

инженер завода жидкостных подшипников, город Дзяйшан, провинция Чжецзянь  
hangyulei1992@163.com

**Хан Юлей**

инженер завода жидкостных подшипников, город Дзяйшан, провинция Чжецзянь  
hangyulei1992@163.com,

**Савин Леонид Алексеевич**

доктор техн. наук, профессор кафедры мехатроники, механики и робототехники, Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева  
savin3257@mail.ru

Y.N. KAZAKOV, HANG YULEI, ZHOU WEN YAN, L.A. SAVIN

## EVALUATION OF THE EFFECT OF DEFORMATIONS OF SATELLITE AXES OF PLANETARY GEARBOXES ON THE LOAD CAPACITY OF SLIDING BEARINGS

**Abstract.** *The working conditions of heavy-loaded plain bearings of planetary multiplier pinion axes are considered. The calculation of axle deformations under the action of hydrodynamic reactions of the lubricating layer is carried out. The results of calculation of load capacity and friction torque in bearings under conditions of rotation of gears and relatively fixed axes are presented.*

**Keywords:** *satellite axles, planetary multipliers, plain bearings, hydrodynamic forces, modeling, deformations, minimum clearance, friction moment, load capacity, energy characteristics, design.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Polinder H. Overview of and trends in wind turbine generator systems // IEEE Power and Energy Society General Meeting. 2011. R. 1–8.
2. Isidoril A., Rossi F. M., Blaabjerg F. Thermal loading and reliability of 10-MW multilevel wind power converter at different wind roughness classes // IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. 50 (1). R. 484–494.
3. S. Shanbr, F. Elasha, ZH. Teysheyra. Obnaruzheniye neispravnostey podshipnikov v korobkakh peredach vetroturbin.. Mezhd. konferentsiya po diagnostike, prognozirovaniyu i kontrolyu (SDPC), 2017
4. G. de Kaa, M. Kampa. Korobka peredach v sravnenii s pryamym privodom - novyye tekhnologicheskiye kharakteristiki. Croonwolter & dros, Marten Misveg 25, 3068AV, Rotterdam, Niderlandy.
5. TAVNE P. Offshore wind turbines: Reliability, availability and maintenance. London: The Institution of Engineering and Technology, 2012.
6. WALFOD C A. Wind turbine reliability: Understanding and minimizing wind turbine operation and maintenance costs. USA: Sandia National Laboratories, 2006.
7. HANSEN A D, HANSWN L H. Wind turbine concept market penetration over 10 years ( 1995-2004). Wind Energy, 2007, 10( 1): 81-97.
8. L.A. Savin, O.V. Solomin Avtomatizirovanny raschet rotornykh mashin: monografiya – M.: Mashinostroyeniye-1, 2006. – 368 s.
9. Shengbo Li, Alexander Babin, Denis Shutin, Yu N Kazakov, Leonid Savin Active Hybrid Journal Bearings with Lubrication Control: Towards Machine Learning Tribology International 175(4):107805
10. Yu N Kazakov, Alexey V Kornaev, Denis Shutin, Shengbo Li, Leonid Savin Active Fluid-Film Bearing With Deep Q-Network Agent-Based Control System Journal of Tribology 144(8):1-37
11. Dynamic Lubrication Analysis Program 3.10.8297.18177 (2022/9/19 10 : 05 : 54) Izdatelstvo : Xian Jiaotong University , Light and Salt (Nanjing) Technology Co., URL : <https://gr.xjtu.edu.cn/zh/web/peishiyuan/dlap>
12. Semken R. S. Direct-drive permanent magnet generators for high-power wind turbines: Benefits and limiting factors // IET Renewable Power Generation. 2012. Vol. 6 (1).R. 1–8.
13. Zhu W. D., Wang X. F. Design, Modeling and Simulation of a Geared Infinitely Variable Transmission // Journal of Mechanical Design. 2014. Vol. 136 (7). R. 071011–071011-9.
14. Skaare B., Hörnsten B., Nielsen F. G. Modeling, simulation and control of a wind turbine with a hydraulic transmission system // Wind Energy. 2013. Vol. 16 (8). R. 1259–1276.
15. Diepeveen N. F. B. On the application of fluid power transmission in offshore wind turbines. PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft, 2013.

**Kazakov Yuri Nikolaevich**

magister of the Department of Mechatronics, Mechanics and Robotics Orel, Oryol State University named after I.S. Turgenev  
nastepanin02@mail.ru

**Zhou Wen Yan**

Engineer of Zhejiang SF Oilless Bearing Co.,Ltd., Jiashan County, Zhejiang Province.  
hangyulei1992@163.com

**Hang Yulei**

Engineer of Zhejiang SF Oilless Bearing Co.,Ltd, Jiashan County, Zhejiang Province.  
hangyulei1992@163.com

**Savin Leonid Alekseevich**

Doctor of Engineering. Sci., Professor of the Department of Mechatronics, Mechanics and Robotics, Russia, Oryol, Oryol State University named after I.S. Turgenev  
savin3257@mail.ru

© Ю.Н. Казаков, Хан Юлей, Джоу Веньян, Л.А. Савин, 2023

УДК 621.865.8

DOI: 10.33979/2073-7408-2023-358-2-145-155

Е.А. ДУДОРОВ

МЕТОД КОПИРУЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ С ОБРАТНОЙ СИЛОМОМЕНТНОЙ СВЯЗЬЮ



**Аннотация.** Антропоморфная робототехника в перспективе будет иметь достаточно широкую область применения: в быту, в индустрии обслуживания и сервиса, при выполнении аварийно-спасательных работ, при исследовании ближнего и дальнего космоса. В статье рассматриваются результаты исследовательской работы по созданию технологии управления антропоморфным робототехническим комплексом торсового типа. Рассматриваются особенности технологии управления антропоморфным роботом с помощью задающего устройства копирующего типа с обратной силомоментной связью.

В рамках разработки антропоморфного робота рассматриваются его структурная и конструктивная схема. В качестве одного из таких технологических решений рассматривается адаптивное регулирование интенсивности (уровня) обратных связей, которое приспособляется к условиям работы конкретного оператора. Рассматривается человеко-машинное взаимодействие в контуре управления «оператор-робот-среда» с применением дистанционно-управляемых роботов с интерактивным управлением, обладающих высокой степенью интеллектуальности. Робот не только принимает от человека команды целеуказания для их исполнения, но и сам активно участвует в распознавании обстановки и принятии решения, помогая в этом человеку-оператору.

**Ключевые слова:** робот, антропоморфная робототехническая платформа, технологический макет, робототехнический комплекс, копирующее управление, комбинированное управление, силомоментная связь.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сорокин, В. Г. Принципы профессионального взаимодействия космонавта с антропоморфным роботом космического назначения в копирующем режиме / В. Г. Сорокин, Л. М. Королев // Научное значение трудов К.Э. Циолковского: история и современность: Материалы 55-х Научных чтений памяти К.Э. Циолковского, Калуга, 15–17 сентября 2020 года. Том Часть 2. – Калуга: Индивидуальный предприниматель Стрельцов Илья Анатольевич, 2020. – С. 196-198. – EDN MWGUXD.
2. Богданов, А. А. Робот космического назначения как составляющая научной аппаратуры / А. А. Богданов, И. М. Кутлубаев, А. Ф. Пермяков // Пилотируемые полеты в космос. – 2018. – № 3(28). – С. 83-96. – EDN YLTUFV.
3. Пермяков А.Ф., Дудоров Е.А. Подготовка и проведение космического эксперимента с применением антропоморфного робота «ФЕДОР» / Пермяков А.Ф., Дудоров Е.А., Сохин И.Г., Шпонько А.А. // Сварочное производство. 2021. №3. С. 53-60.
4. J. Chestnutt, M. Lau, G. Cheung. Footstep planning for the Honda ASIMO humanoid. Conference: Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on. DOI:10.1109/ROBOT.2005.1570188.
5. S. Kuindersma, R. Deits, M. Fallon. Optimization-based locomotion planning, estimation, and control design for the atlas humanoid robot. Autonomous Robots 40 (3), July 2015, DOI:10.1007/s10514-015-9479-3.
6. A.P. Friz Applying the TAI Framework on Tesla Bot. December 20th, 2021, DOI:10.13140/RG.2.2.22323.96801.
7. J. Lemburg, J.Gea Fernandez, M. Eich, D. Mronga. AILA - Design of an autonomous mobile dual-arm robot. Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation. Conference: IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2011, Shanghai, China, 9-13 May 2011, DOI:10.1109/ICRA.2011.5979775.
8. Лесков, А. Г., К. В. Бажинова, Е. В. Селиверстова Описание кинематики антропоморфных роботов методом блочных матриц // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение. – 2018. – № 6(123). – С. 102-111. – DOI 10.18698/0236-3933-2018-6-102-111. – EDN YRPWWL.
9. Качанов, С. А. Перспективы применения робототехнических комплексов в международных гуманитарных операциях // I Международная научно-практическая конференция по развитию робототехники в области обеспечения безопасности жизнедеятельности "RoboEmercom": Материалы I Международной научно-практической конференции по развитию робототехники в области обеспечения безопасности жизнедеятельности, Москва, 19 октября 2021 года. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, 2021. – С. 68-74. – EDN SARRCR.
10. В. А. Дикарев, А. Н. Симбаев, А. Ю. Кикина и др. Проблема обеспечения соответствия кинематических характеристик исполнительных и задающих устройств антропоморфных робототехнических систем для перспективных пилотируемых космических программ // Пилотируемые полеты в космос. – 2022. – № 4(45). – С. 54-71. – EDN VXUBPB.
11. Жданова Ю.И., Дудоров Е.А., Богданов А.А. Обоснование структурной схемы исполнительной группы антропоморфного захвата с групповым приводом и адаптивным управлением движения звеньев / Жданова Ю.И., Дудоров Е.А., Богданов А.А. // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2022. №2 (214). С. 20-26.
12. Дудоров, Е. А. Имитационно-моделирующие программно-аппаратные комплексы тренировки операторов робототехнических комплексов // Пилотируемые полеты в космос: Материалы XIV Международной научно-практической конференции, Звездный городок, 17–19 ноября 2021 года / Государственная корпорация по космической деятельности "Роскосмос"; Федеральное государственное бюджетное учреждение "Научно-исследовательский испытательный центр подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина". – Звездный городок:

Научно-исследовательский испытательный центр подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина, 2021. – С. 35. – EDN LXIQSU.

13. Дудоров, Е. А. Имитационно-моделирующий стенд эргономического сопровождения робототехнических систем космического назначения // XIV Всероссийская мультиконференция по проблемам управления МКПУ-2021: материалы XIV мультиконференции: в 4 т., Дивноморское, Геленджик, 27 сентября – 02 2021 года. Том 1. – Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2021. – С. 132-134. – EDN MWZQPN.

14. Дудоров, Е. А. Робототехнические системы космического назначения // Космическая техника и технологии. – 2022. – № 3(38). – С. 66-81. – EDN LIDCJG.

15. Дудоров, Е. А., И. Г. Сохин. Предназначение и задачи робототехнических систем в российской лунной программе // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2020. – № 12(729). – С. 3-15. – DOI 10.18698/0536-1044-2020-12-3-15. – EDN CGYYPB.

**Дудоров Евгений Александрович**

Кандидат технических наук, доцент кафедры МиТОДиМ МГТУ им. Носова, лауреат премии РФ в области науки и техники, исполнительный директор АО «Научно-производственное объединение «Андроида техника»  
109518, г. Москва, ул. Грайвороновская, д. 23,  
e-mail: dudorov@npo-at.com).

---

E.A. DUDOROV

**THE METHOD OF COPYING CONTROL  
WITH THE FORCE-TORQUE FEEDBACK**

**Abstract.** *The anthropomorphic robotics will have a sufficiently wide scope of application in the future: in everyday life, in the service and maintenance industry, when performing emergency rescue operations, when exploring near and far space. The article discusses the results of research work on the creation of a control technology for an anthropomorphic robotic complex of the torso type. The features of the technology of the anthropomorphic robot control using a copying-type control device with the force-torque feedback are considered.*

*As part of the development of the anthropomorphic robot, its structural and constructive scheme are considered. Adaptive regulation of the intensity (level) of feedbacks, which adapts to the working conditions of a particular operator, is considered as one of such technological solutions. The human-machine interaction in the control loop "operator-robot-environment" with the use of remote-controlled robots with interactive control with a high degree of intelligence is considered. The robot not only receives target designation commands from a person for their execution, but also actively participates in recognizing the situation and making decisions, assisting the human operator therein.*

**Keywords:** *robot, anthropomorphic robotic platform, technological mock-up, robotic complex, copying control, combined control, force-torque feedback.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Sorokin, V. G. Printsipy professionalnogo vzaimodeystviya kosmonavta s antropomorfnyim robotom kosmicheskogo naznacheniya v kopiruyushchem rezhime / V. G. Sorokin, L. M. Korolev // Nauchnoye znacheniye trudov K.E. Tsiolkovskogo: istoriya i sovremennost: Materialy 55-kh Nauchnykh chteniy pamyati K.E. Tsiolkovskogo, Kaluga, 15–17 sentyabrya 2020 goda. Tom Chast

2. – Kaluga: Individualnyy predprinimatel Streltsov Ilya Anatolyevich, 2020. – S. 196-198. – EDN MWGUXD.

2. Bogdanov, A. A. Robot kosmicheskogo naznacheniya kak sostavlyayushchaya nauchnoy apparatury / A. A. Bogdanov, I. M. Kutlubayev, A. F. Permyakov // Pilotiruyemye polety v kosmos. – 2018. – № 3(28). – S. 83-96. – EDN YLTUFV.

3. Permyakov A.F., Dudorov Ye.A. Podgotovka i provedeniye kosmicheskogo eksperimenta s primeneniym antropomorfno robotov «FEDOR» / Permyakov A.F., Dudorov Ye.A., Sokhin I.G., Shponko A.A. // Svarochnoye proizvodstvo. 2021. №3. S. 53-60.

4. J. Chestnutt, M. Lau, G. Cheung. Footstep planning for the Honda ASIMO humanoid. Conference: Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on. DOI:10.1109/ROBOT.2005.1570188.

5. S. Kuindersma, R. Deits, M. Fallon. Optimization-based locomotion planning, estimation, and control design for the atlas humanoid robot. Autonomous Robots 40 (3), July 2015, DOI:10.1007/s10514-015-9479-3.

6. A.P. Friz Applying the TAIL Framework on Tesla Bot. December 20th, 2021, DOI:10.13140/RG.2.2.22323.96801.

7. J. Lemburg, J.Gea Fernandez, M. Eich, D. Mronga. AILA - Design of an autonomous mobile dual-arm robot. Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation. Conference: IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2011, Shanghai, China, 9-13 May 2011, DOI:10.1109/ICRA.2011.5979775.

8. Leskov, A. G., K. V. Bazhinova, Ye. V. Seliverstova Opisaniye kinematiki antropomorfnykh robotov metodom blochnykh matrits // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Bauman.

Seriya Priborostroyeniye. – 2018. – № 6(123). – S. 102-111. – DOI 10.18698/0236-3933-2018-6-102-111. – EDN YRPWWL.

9. Kachanov, S. A. Perspektivy primeneniya robototekhnicheskikh kompleksov v mezhdunarodnykh gumanitarnykh operatsiyakh // I Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya po razvitiyu robototekhniki v oblasti obespecheniya bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti "RoboEmercom": Materialy I Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii po razvitiyu robototekhniki v oblasti obespecheniya bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti, Moskva, 19 oktyabrya 2021 goda. – Moskva: Vserossiyskiy nauchno-issledovatel'skiy institut po problemam grazhdanskoй oborony i chrezvychaynykh situatsiy MCHS Rossii, 2021. – S. 68-74. – EDN SARRCR.

10. V. A. Dikarev, A. N. Simbayev, A. YU. Kikina i dr. Problema obespecheniya sootvetstviya kinematicheskikh kharakteristik ispolnitelnykh i zadayushchikh ustroystv antropomorfnykh robototekhnicheskikh sistem dlya perspektivnykh pilotiruyemykh kosmicheskikh programm // Pilotiruyemye polety v kosmos. – 2022. – № 4(45). – S. 54-71. – EDN BXUBPB.

11. Zhdanova YU.I., Dudorov Ye.A., Bogdanov A.A. Obosnovaniye strukturnoy skhemy ispolnitelnoy gruppy antropomorfno go zakhvata s gruppovym privodom i adaptivnym upravleniyem dvizheniya zveney / Zhdanova YU.I., Dudorov Ye.A., Bogdanov A.A. // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskiye nauki. 2022. №2 (214). S. 20-26.

12. Dudorov, Ye. A. Imitatsionno-modeliruyushchiye programmno-apparatnyye komplekсы trenirovki operatorov robototekhnicheskikh kompleksov // Pilotiruyemye polety v kosmos: Materialy XIV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Zvezdnyy gorodok, 17–19 noyabrya 2021 goda / Gosudarstvennaya korporatsiya po kosmicheskoy deyatelnosti "Roskosmos"; Federalnoye gosudarstvennoye byudzhethnoye uchrezhdeniye "Nauchno-issledovatel'skiy ispytatel'nyy tsentr podgotovki kosmonavtov imeni YU.A. Gagarina". – Zvezdnyy gorodok: Nauchno-issledovatel'skiy ispytatel'nyy tsentr podgotovki kosmonavtov imeni YU.A. Gagarina, 2021. – S. 35. – EDN LXIQSU.

13. Dudorov, Ye. A. Imitatsionno-modeliruyushchiy stend ergonomicheskogo soprovozhdeniya robototekhnicheskikh sistem kosmicheskogo naznacheniya // XIV Vserossiyskaya multikonferentsiya po problemam upravleniya MKPU-2021: materialy XIV multikonferentsii: v 4 t., Divnomorskoye, Gelendzhik, 27 sentyabrya – 02 2021 goda. Tom 1. – Rostov-na-Donu: Yuzhnyy federalnyy universitet, 2021. – S. 132-134. – EDN MWZQPN.

14. Dudorov, Ye. A. Robototekhnicheskiye sistemy kosmicheskogo naznacheniya // Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii. – 2022. – № 3(38). – S. 66-81. – EDN LIDCJG.

15. Dudorov, Ye. A., I. G. Sokhin. Prednaznacheniya i zadachi robototekhnicheskikh sistem v rossiyskoy lunnoy programme // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye. – 2020. – № 12(729). – S. 3-15. – DOI 10.18698/0536-1044-2020-12-3-15. – EDN CGYYPB.

#### Dudorov Evgeny Aleksandrovich

Candidate of Technical Sciences, docent of the Department of Machines and Technologies of Pressure Treatment and Mechanical Engineering of Nosov Magnitogorsk State Technical University, winner of the Russian Federation award in the field of science and technology, Executive Director of JSC "Scientific production association "Android technics" 23 Grayvoronovskaya str., Moscow, 109518, e-mail: dudorov@npo-at.com)

© Е.А. Дудоров, 2023

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

УДК 629.127.4.073

DOI: 10.33979/2073-7408-2023-358-2-156-163

Я.Н. ГАЙНУЛЛИНА, М.И. КАЛИНИН, Е.В. ПАШКОВ, А.А. ЧЕТВЁРКИН

### **ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГИПЕРБАРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ АППАРАТА ЖИДКОСТНОГО ДЫХАНИЯ**

**Аннотация.** В работе рассмотрены особенности проектирования и конструирования инновационного аппарата жидкостного дыхания замкнутого цикла, оснащенного модулями оксигенации и десатурации и системой биофильтров. Аппарат предназначен для эксплуатации в условиях гипербарии.

**Ключевые слова:** скруббер, оксигенатор, десатурация, жидкостное дыхание, гипербария, биомедицина.

*Работа выполнена при поддержке программы Приоритет-2030 Севастопольского государственного университета (стратегический проект №2 "Прорывные исследования и разработки в области жидкостного дыхания").*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калинин М.И. Особенности проектирования и технологии изготовления морской глубоководной капсулы / М.И. Калинин, Е.В. Пашков, П.К. Сопин, Я.Н. Гайнуллина // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2019. – № 4 (336). – С. 197-203.
2. Гайнуллина Я.Н. Системный подход к проектированию и изготовлению мобильной баровакуумной камеры для исследований биологических объектов / Я.Н. Гайнуллина, М.И. Калинин, В.П. Поливцев, Е.В. Пашков // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2021. – № 4 (348). – С. 4-13.
3. Поливцев В.П. Исследование технологии жидкостного дыхания методом погружения / всплытия биологического объекта в гидравлической камере с высоким давлением / В.П. Поливцев, В.В. Поливцев // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2021. – № 4 (348). – С. 183-190.
4. Поливцев В.П. Исследование технологии жидкостного дыхания для удаления азота из организма биообъекта посредством информационно измерительной системы / В.П. Поливцев, А.Н. Круговой, М.И. Калинин, В.В. Поливцев // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2021. – № 6 (350). – С. 172-186.
5. Гайнуллина Я.Н. Развитие технологий жидкостного дыхания для обеспечения длительных глубоководных исследований / Я.Н. Гайнуллина, М.И. Калинин, Е.В. Пашков, В.П. Поливцев // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2021. – № 6 (350). – С. 194-199.
6. Гайнуллина Я.Н. Исследование работоспособности элементов систем жизнеобеспечения биологических объектов в реализации технологий жидкостного дыхания / Я.Н. Гайнуллина, Е.В. Пашков, М.И. Калинин, В.П. Поливцев, П.К. Сопин, А.А. Четверкин // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2022. – № 1 (351). – С. 148 – 154.
7. Гайнуллина Я.Н. Техническое обеспечение процессов жидкостного дыхания / Я.Н. Гайнуллина, Е.В. Пашков, М.И. Калинин, П.К. Сопин, // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2022. – № 4 (354). – С. 3 – 11.
8. Поливцев В.П. Разработка и исследование гидравлических испытательных камер высокого давления / Поливцев В.П., Поляков А.М., Поливцев В.В. // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2022. – № 4 (354). – С. 23 – 32.
9. Ханин М.А. Оптимальная частота дыхания человека / М.А. Ханин, В.Г. Левидный. – Рига.:Биомеханика, 1975. – 224 с.
10. Ханин М.А. Влияние скорости оксигенации на диффузионную проводимость лёгких / М.А. Ханин, И.Б. Бухаров. – Рига.:Биомеханика, 1975. – 215 с.
11. Егоров В.И. Подводные буксируемые системы. – Л.: Судостроение, 1981. – 303 с.
12. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1970. – 391 с.
13. Патрашев А.Н. Прикладная гидромеханика / А.Н. Патрашев, Л.А. Кивако, С.И. Гожий. – М.: Воениздат, 1970. – 407с.
14. Седов Л.И. Методы подобия и размерность в механике. – М.: Наука, 1965. – 265 с.
15. Жуков Р.Ф. Системы приборы и устройства подводного поиска / Р.Ф. Жуков, А.А. Кондратович, С.Д. Могильный. – М.: Воениздат, 1972. – 315 с.
16. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей 2т. – М.: Мир, 1991. – 187 с.
17. Сухоруков А.Л. Об использовании численных методов динамики вязкой жидкости для определения коэффициентов вращательных производных гидродинамических сил и моментов / А.Л. Сухоруков, М.А. Титов, И.А. Чернышёв // *Науч. тр. Фундаментальная и прикладная гидрофизика* – СПб: Наука, 2016. – № 3. – С. 66 – 79.
18. Пантакар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 299 с.
19. Каудерер Г. Нелинейная механика. – М.: Изд-во иностранной лит-ры, 1991. – 417 с.

**Гайнуллина Яна Николаевна**

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,  
 Научный сотрудник лаборатории  
 «Экспериментальные системы жизнеобеспечения биологических объектов» г. Севастополь,  
 ул. Гоголя, д. 14  
 тел. +7(8692) 417741  
 e-mail: medeya-ru@yandex.ru

**Пашков Евгений Валентинович**

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», доктор технических наук, профессор  
 кафедры «Приборные системы и автоматизация технологических процессов»  
 г. Севастополь, ул. Университетская, 33  
 тел. +7(8692)550-077  
 e-mail: pashkov@sevsu.ru

**Калинин Михаил Иванович**

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,  
 кандидат технических наук, доцент, руководитель группы  
 лаборатории «Экспериментальные системы жизнеобеспечения биологических объектов»  
 г. Севастополь, ул. Гоголя, д. 14  
 тел. +7(8692) 417741  
 e-mail: kalininsev@mail.ru

**Четвёркин Александр Алексеевич**

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,  
 руководитель группы лаборатории «Экспериментальные системы жизнеобеспечения биологических объектов»  
 г. Севастополь, ул. Университетская, 33  
 тел. +7(8692) 545-023  
 chetvyorkin14@yandex.ru

YA.N. GAINULLINA, M.I. KALININ, E.V. PASHKOV, A.A. CHETVERKIN

**FEATURES OF THE DESIGN AND MANUFACTURE  
 OF HYPERBARIC MODULES OF THE DEVICE  
 LIQUID BREATHING**

**Abstract.** *The paper considers the features of designing and constructing an innovative closed-cycle liquid breathing apparatus equipped with oxygenation and desaturation modules and a biofilter system. The device is designed for operation in hyperbaria conditions.*

**Keywords:** scrubber, oxygenator, desaturation, liquid respiration, hyperborea, biomedicine.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Kalinin M.I. Osobennosti proektirovaniya i tehnologii izgotovleniya morskoy glybokovodnoy kapsyli / M.I. Kalinin, E.V.Pshkov, P.K. Sopin, Ya..N. Gaynullina // Fyndamentalnie I prikladnie problemi tehniki I tehnologii. – Orel: OGU im. I.S. Turgeneva. 2019. – №4 (336). – S. 197 – 203.
2. Gaynullina Ya. N. Sistemniy podkhod k proektirovaniyu i izgotovleniyu mobilnoy barovakuumnoi kameri dlya issledovaniya biologicheskikh obektov / Ya. N. Gaynullina, M.I. Kalinin, V.P. Polivtcev, E.V. Pashkov // Fyndamentalnie i prikladnie problemi tehniki I tehnologii. – Orel: OGU im. I.S. Turgeneva. 2021. – №4 (348). – S. 4 – 13.
3. Polivtcev V.P. Issledovanie tehnologii zhidkostnogo dikhaniya metodom pogryzheniya ( vsplitie biologicheskogo obekta v gidravlicheskoj kamere s visokim davleniem) / V.P. Polivtcev, V.V. Polivtcev // Fyndamentalnie i prikladnie problemi tehniki I tehnologii. – Orel: OGU im. I.S. Turgeneva. 2021. – №4 (348). – S.183 – 190.
4. Polivtcev V.P. Issledovanie tehnologii zhidkostnogo dikhaniya dlya ydaleniya azota iz organizma bioobekta posredstvom informacii / V.P. Polivtcev, A.N. Krygovoï, M.I.,Kalinin, V.V. Polivtcev // Fyndamentalnie i prikladnie problemi tehniki I tehnologii. – Orel: OGU im. I.S. Turgeneva. 2021. – №6 (350). – S.172 – 186.
5. Gaynullina Ya. N. Razvitie tekhnologiy zhidkostnogo dikhaniya dlya obespecheniya dlitelnykh glybokovodnykh issledovaniy / Ya. N. Gaynullina, M.I. Kalinin, E.V.Pshkov, V.P. Polivtcev // Fyndamentalnie i prikladnie problemi tehniki I tehnologii. – Orel: OGU im. I.S. Turgeneva. 2021. – №6 (350). – S.194 – 199.
6. Gaynullina Ya. N. Issledovanie rabotosposobnosti elementov sistem zhizneobespecheniya biologicheskikh obektov v realizacii tekhnologiy zhidkostnogo dikhaniya / Ya. N. Gaynullina, E.V.Pshkov, M.I. Kalinin, V.P. Polivtcev, P.K. Sopin, A.A.Chetverkin // Fyndamentalnie i prikladnie problemi tehniki I tehnologii. – Orel: OGU im. I.S. Turgeneva. 2022. – №1 (351). – S.148 – 154.
7. Gaynullina Ya. N. Tekhnicheskoe obespechenie protsessov zhidkostnogo dikhaniya / Ya. N. Gaynullina, E.V.Pshkov, M.I. Kalinin, P.K. Sopin // Fyndamentalnie i prikladnie problemi tehniki I tehnologii. – Orel: OGU im. I.S. Turgeneva. 2022. – №4 (354). – S.3 – 11.
8. Polivtcev V.P. Razrabotka i issledovanie gudravlicheskiikh ispitatelnykh kamer visokogo davleniya / V.P. Polivtcev., Polyakov A.M., V.V. Polivtcev // Fyndamentalnie i prikladnie problemi tehniki I tehnologii. – Orel: OGU im. I.S. Turgeneva. 2022. – №4 (354). – S.23 – 32.
9. Khanin M.A. optimalnaya chastota dikhniya cheloveka / M.A. Khanin, V.G. Levidniy. – Riga.:Biomekhanika,1975. – 224 s.
10. Khanin M.A. Vliyanie skorosti oksigenacii na diffuzionnyu provodimost legkikh / M.A. Khanin, I.B. Bukharov. – Riga.:Biomekhanika, 1975. – 215 s.
11. Egorov V.I. Podvodnie byksiruemie sistemi. – L.: Sudostroenie, 1981. – 303 s.
12. Loytcyanskiy L.G. Mekhanika zhidkosti gaza. – M.: Nayka, 1970. – 391 s.
13. Patrashev A.N. Prikladnaya gidromekhanika / A.N. Patrashev, L.A. Kivako, S.I. Gozhiy. – M.: Voenizdat, 1970. – 407s.

14. Sedov L.I. Metodi podobiya I razmernoost v mekhanike. – M.: Nayka, 1965. – 265 s.
15. Zhykov R.F. Sistemi pribori i ustroystva podvodnogo poiska / R.F. Zhykov, A.A. Kondratovich, S.D. Mogilny. – M.: Voenizdat, 1972. – 315 s.
16. Fletcher K. Vichislitelnie metodi v dinamike zhidkostey 2t. – M.: Mir, 1991. – 187 s.
17. Sykhorykov A.L. Ob ispolzovanii chislennikh metodov dinamiki vyzkoy zhidkosti dlya opredeleniya koeffitsientov vrashchatelnikh proizvodnikh gidrodinamicheskikh sil I momentov / A.L. Sykhorykov, M.A. Titov, I.A. Chernishov // Naych.tr. Fyundamentalnaya I prikladnaya gidrofizika – SPb: Nayka, 2016. – № 3. – S. 66 – 79.
18. Pantakar S. Chislennie metodi resheniya zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti. – M.: Energoatomizdat, 1984. – 229s.
19. Kayderer G. Nelineynaya mekhanika. – M.: izd-vo inostrannoy lit-ri, 1991. – 417 s.

**Gainullina Yana Nikolaevna**

Sevastopol State University,  
Researcher at the laboratory "Experimental life Support systems of biological objects", Sevastopol,  
Gogol str., 14  
tel. +7(8692) 417741  
e-mail: medeya-ru@yandex.ru

**Kalinin Mikhail Ivanovich**

Sevastopol State University,  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Head of the laboratory group "Experimental life support systems for biological objects"  
Sevastopol, Gogol str., 14 tel. +7(8692) 417741  
e-mail: kalinin sv@mail.ru

**Pashkov Yevgeny Valentinovich**

Sevastopol State University,  
Doctor of Technical Sciences, Professor of the  
Department «Instrument Systems and automation of technological processes»  
Sevastopol, Str. University, 33, tel. +7(8692) 550-007  
E-mail: pashkov@sevsu.ru

**Chetverkin Alexander Alekseevich**

Sevastopol State University,  
Head of the laboratory group "Experimental Life Support systems of biological objects"  
Sevastopol, Universitetskaya str., 33  
tel. +7(8692) 545-023  
E-mail: chetvyorkin14@yandex.ru

© Я.Н. Гайнуллина, М.И. Калинин, Е.В. Пашков, А.А. Четвёркин, 2023

УДК 620.179.12

DOI: 10.33979/2073-7408-2023-358-2-164-169

А.И. БАЛАКИН, Н.Ю. МИРЗОЯН, Н.А. БАЛАКИНА

## **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЗАЗОРА МЕЖДУ ВИХРЕТОКОВЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ И ПОВЕРХНОСТЬЮ НА ТОЧНОСТЬ КОНТРОЛЯ**

**Аннотация.** Проанализировано влияние зазора между вихретоковым преобразователем и объектом контроля на точность его работы. Предложено решение, позволяющее уменьшить это влияние. Построены математические модели работы вихретокового преобразователя при прямом включении и включении его в состав параллельного резонансного контура. Представлены результаты моделирования. Показано, что использование параллельного резонансного контура уменьшает значение вносимого напряжения и способствует повышению достоверности и эффективности процесса вихретокового контроля.

**Ключевые слова:** неразрушающий контроль, вихретоковый контроль, вихретоковый преобразователь, зазор, вносимое напряжение, трещина, дефект, обобщенный параметр.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. ГОСТ Р 55611-2013. Контроль неразрушающий вихретоковый. Термины и определения. – Введ. 2015-01-01. - М.: Стандартинформ, 2019. – 16 с.
2. РД 13-03-2006. Методические рекомендации о порядке проведения вихретокового контроля технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах. Сер. 28. Вып. 10/ Колл. авт. М.: Открытое акционерное общество «Научно-технический центр по безопасности в промышленности», 2007. 44 с.
3. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник/ Под.ред. В.В. Клюева/ М.: Машиностроение, 2003 – 656 с.
4. Герасимов В.Г., Покровский А.Д., Сухоруков В.В. Неразрушающий контроль. Книга 3. Электромагнитный контроль. - М.: Высшая школа, 1992. - 312 с.
5. Коптева, Л.Н. Основы вихретокового неразрушающего контроля: учебное пособие / Власов К.В., Бобров А.Л.: СГУПС – Новосибирск: [б.и.], 2015. – 28 с.
6. Неразрушающий контроль. Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 2; Кн. 2. – М.: Машиностроение, 2003. – 421 с.
7. Петушков С.М. О повышении производительности вихретокового контроля/С.М. Петушков// В мире НК. – 2006 – № 1 (31). – С. 54–56.

8. Дерун Е.Н. Влияние колебаний вихретокового преобразователя, включенного в резонансный контур, на характеристики контура // Методы и приборы автоматического неразрушающего контроля.- Рига: РПИ, 1979.- Вып.3.- С.94-101.

9. Учанин В.Н. Вихретоковые методы выявления дефектов в зоне заклепок многослойных авиационных конструкций // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2006. – № 3. – С. 3–12.

**Балакин Алексей Игоревич**  
ФГАОУ ВО Севастопольский  
государственный университет,  
г. Севастополь  
Кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры Приборные  
системы и автоматизация  
технологических процессов  
299053, г. Севастополь,  
ул. Университетская, 33  
Тел. (8692) 55–00–77  
E-mail: AIBalakin@sevsu.ru

**Мирзоян Наталия Юрьевна**  
ФГАОУ ВО Севастопольский  
государственный  
университет, г. Севастополь  
Ассистент кафедры  
Приборные системы и  
автоматизация  
технологических процессов  
299053, г. Севастополь,  
ул. Университетская, 33  
Тел. (8692) 55–00–77

**Балакина Наталья Анатольевна**  
ФГАОУ ВО Севастопольский  
государственный университет,  
г. Севастополь  
Старший преподаватель кафедры  
Приборные системы и  
автоматизация технологических  
процессов  
299053, г. Севастополь,  
ул. Университетская, 33  
Тел. (8692) 55–00–77  
E-mail: NABalakina@sevsu.ru

A.I. BALAKIN, N.Yu. MIRZOYAN, N.A. BALAKINA

## ANALYSIS OF THE EFFECT OF THE GAP BETWEEN THE EDDY CURRENT CONVERTER AND THE SURFACE ON THE CONTROL ACCURACY

**Abstract.** *The effect of the gap between the eddy current converter and the object of control on the accuracy of its operation is analyzed. A solution has been proposed to reduce this influence. Mathematical models of the operation of an eddy current converter with direct activation and its inclusion in a parallel resonant circuit are constructed. Simulation results are presented. It is shown that the use of a parallel resonant circuit reduces the value of the input voltage and contributes to increasing the reliability and efficiency of the eddy current control process.*

**Keywords:** *Non-destructive testing, eddy current control, eddy current converter, gap, insertion voltage, crack, defect, generalized parameter.*

### BIBLIOGRAPHY

1. GOST R 55611-2013. Kontrol nerazrushayushchiy vikhretokovyy. Terminy i opredeleniya. – Vved. 2015-01-01. - M.: Standartinform, 2019. – 16 s.

2. RD 13-03-2006. Metodicheskiye rekomendatsii o poryadke provedeniya vikhretokovogo kontrolya tekhnicheskikh ustroystv i sooruzheniy, primenyayemykh i ekspluatiruyemykh na opasnykh proizvodstvennykh ob"yektakh. Ser. 28. Vyp. 10/ Koll. avt. M.: Otkrytoye aktsionernoye obshchestvo «Nauchno-tekhnicheskiiy tsentr po bezopasnosti v promyshlennosti», 2007. 44 s.

3. Nerazrushayushchiy kontrol i diagnostika. Spravochnik/ Pod.red. V.V. Klyuyeva/M.: Mashinostroyeniye, 2003 – 656 s.

4. Gerasimov V.G., Pokrovskiy A.D., Sukhorukov V.V. Nerazrushayushchiy kontrol. Kniga 3. Elektromagnitnyy kontrol. - M.: Vysshaya shkola, 1992. - 312 s.

5. Kopteva, L.N. Osnovy vikhretokovogo nerazrushayushchego kontrolya: uchebnoye posobiye / Vlasov K.V., Bobrov A.L.: SGUPS – Novosibirsk: [b.i.], 2015. – 28 s.

6. Nerazrushayushchiy kontrol. Spravochnik: V 7 t. Pod obshch. red. V.V. Klyuyeva. T. 2; Kn. 2. – M.: Mashinostroyeniye, 2003. – 421 s.

7. Petushkov S.M. O povyshenii proizvoditelnosti vikhretokovogo kontrolya/S.M. Petushkov// V mire NK. – 2006 – № 1 (31). – S. 54–56.

8. Derun Ye.N. Vliyaniye kolebaniy vikhretokovogo preobrazovatelya, vklyuchennogo v rezonansnyy kontur, na kharakteristiki kontura // Metody i pribory avtomaticheskogo nerazrushayushchego kontrolya.- Riga: RPI, 1979.- Vyp.Z.- S.94-101.

9. Uchanin V.N. Vikhretokovyye metody vyyavleniya defektov v zone zaklepok mnogoslonykh aviatsionnykh konstruktsiy // Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchiy kontrol. – 2006. – № 3. – С. 3–12.

**Balakin Alexey Igorevich**  
Sevastopol State University,  
Sevastopol  
Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor, Associate  
Professor of the Department  
Instrument Systems and Automation  
of Technological Processes  
299053, Sevastopol, st. University, 33

**Mirzoyan Natalia Yurievna**  
Sevastopol State University,  
Sevastopol  
graduate student of the Department  
Department Instrument Systems and  
Automation of Technological  
Processes  
299053, Sevastopol, st. University, 33  
Ph.: (8692)55-00-77

**Balakina Natalia Anatolyevna**  
Sevastopol State University,  
Sevastopol  
senior lecturer of the Department  
Instrument Systems and Automation  
of Technological Processes  
299053, Sevastopol, st. University, 33  
Ph.: (8692)55-00-77  
E-mail: NABalakina@sevsu.ru

И.И. СВИРИДЕНКО, Д.В. ШЕВЕЛЕВ, В.Ф. ТИШКОВ, С.С. БЕЗОТОСНЫЙ, В.Н. ГРИГОРЬЕВА

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ СВЧ-УСТАНОВКА ОБЕЗВРЕЖИВАНИЯ ОПАСНЫХ МЕДИЦИНСКИХ ОТХОДОВ

**Аннотация.** Представлено описание экспериментальной установки обезвреживания опасных медицинских отходов с использованием СВЧ-технологии, позволяющей существенно уменьшить объем отходов и привести их в форму, пригодную для захоронения. Проанализированы известные методы обезвреживания опасных медицинских отходов, рассмотрены их недостатки. Приведены результаты экспериментального исследования применения СВЧ-технологии: процесса СВЧ-пиролиза исходных материалов, процесса плазменной СВЧ-деструкции пиролизных газов, процесса кондиционирования твердых остатков пиролиза. Представлены фотографии экспериментальной установки и ее элементов, а также различных режимов горения плазменного разряда в камере плазмохимической деструкции пиролизных газов и результатов остекловывания углеродистозольных остатков с добавлением различных стеклообразующих флюсов. Показано, что установка СВЧ-пиролиза с последующим остекловыванием зольного остатка является наиболее оптимальной для решения задачи обезвреживания опасных медицинских отходов, так как не образует вторичных отходов и позволяет получать продукт полностью безопасный для захоронения.

**Ключевые слова:** опасные медицинские отходы, плазменная СВЧ-деструкция, высокотемпературное спекание зольных остатков со стеклообразующими добавками.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бесконтактная утилизация. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rostec.ru/news/beskontaktnaya-utilizatsiya-kak-pererabotayut-kovidnyy-musor/> (дата обращения: 17.12.2022).
2. Утилизация отходов, образовавшихся в ходе борьбы с COVID-19. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://news.un.org/ru/story/2022/02/1417662> (дата обращения: 11.12.2022).
3. Оценка управления медицинскими отходами в период пандемии COVID-19. ПРООН. – 2021. – 52 с.
4. Санитарные правила и нормы СанПиН 2.1.3684-21. «Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению населения, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий». Утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021, № 3. Введ. в действие с 01.03.2021.
5. Оборудование для утилизации медицинских отходов. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://news.solidwaste.ru/2021/09/oborudovanie-dlya-utilizatsii-meditsinskih-othodov/> (дата обращения: 05.10.2022).
6. Балакаева А.В., Русаков Н.В. Сравнительная оценка эффективности установок обеззараживания медицинских отходов. – Гигиена и санитария. – 2016. – 95(7). – С. 614 – 616.
7. Холявко Т.И. Факторы негативного воздействия медицинских отходов при их утилизации. Наука и современность, 2014. – С. 11–15
8. Безопасное управление отходами медико-санитарной деятельности. Краткая информация Всемирная организация здравоохранения, 2017. – 32 с.
9. Румак В.С., Кхань Ч.К., Кузнецов А.Н., Софронов Г.А., Павлов Д.С. Воздействие диоксинов на окружающую среду и здоровье человека // Вестник Российской академии наук, 2009. – № 2. – С. 124–130.
10. Обоснование технологических процессов, реализующих комплексный метод обезвреживания, деструкции и кондиционирования опасных медицинских отходов на основе объемного безэлектродного СВЧ-разряда: Отчет о НИР (итоговый) / Севастоп. гос. ун-т (СевГУ); руководитель И.И. Свириденко. – Севастополь, 2021. – 58 с.
11. Голубев В.П. Применение инновационного метода СВЧ-излучения для пиролитического обезвреживания медицинских отходов / В.П. Голубев, Т.С. Благовещенская // Экология на предприятии, 2015. – № 5. – С. 29-37.
12. Установка УОМО-01/150 для обеззараживания медицинских отходов. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.mediko.ru/index.php?id=9658> (дата обращения: 04.12.2022).
13. Использование электромагнитного излучения сверхвысокой частоты для обеззараживания инфицированных медицинских отходов. Методические рекомендации МР 02.007-06. Дата введения: 6 мая 2006 г.



14. Сорока Н.В. Особенности применения технологии ВЧ и СВЧ плазменного термоллиза твердых бытовых отходов / Н.В. Сорока, К.А. Корсунов // Вестник Луганского государственного Университета им. В. Даля, 2021. – № 5(47). – С. 211–216.

15. Моссэ А.Л. Мобильная плазменная установка для уничтожения токсичных отходов / А.Л. Моссэ, Г.Э. Савченко, В.В. Савчин, А.В. Ложечник / Химия и химическая технология, 2012. – Том 55. – Вып. 4. – С. 56–62.

16. Моссэ А.Л., Савчин В.В. Плазменные технологии и устройства для переработки отходов. – Беларуская навука, 2015. – 412 с.

17. Ялда К.Д., Рыбакова Е.В. Микроволновое обеззараживание медицинских отходов класса Б и В на примере СВЧ-установки «Стериус». Ремедиум Приволжье, 2016. – № 1 (141) январь-февраль. – С. 34–35.

**Свириденко Игорь Иванович**  
ФГАОУ ВО «Севастопольский  
государственный университет»,  
г. Севастополь,  
доцент кафедры Энергоустановки  
морских судов и сооружений,  
кандидат технических наук  
299053, г. Севастополь,  
ул. Университетская, 33  
тел. +8692543086  
E-mail: i.sviridenko@mail.ru

**Шевелев Дмитрий Владимирович**  
Всероссийский научно-  
исследовательский институт по  
эксплуатации атомных  
электростанций,  
ведущий инженер,  
кандидат технических наук,  
109507, г. Москва, ул. Ферганская, 25  
тел. +74997969133  
E-mail: ontps@mail.ru

**Тишков Виталий Федорович**  
Всероссийский научно-  
исследовательский институт по  
эксплуатации атомных  
электростанций,  
Начальник отдела  
109507, г. Москва, ул.  
Ферганская, 25  
тел. +74997969133  
E-mail: v.tishkov@mail.ru

**Безотосный Сергей Сергеевич**  
Всероссийский научно-  
исследовательский институт  
по эксплуатации атомных  
электростанций,  
ведущий инженер  
109507, г. Москва, ул. Ферганская,  
25  
тел. +74997969133  
E-mail: 79787391497@yandex.ru

**Григорьева Вита Николаевна**  
Всероссийский научно-  
исследовательский институт по  
эксплуатации атомных  
электростанций,  
главный специалист,  
кандидат технических наук  
109507, г. Москва, ул. Ферганская, 25  
тел. +74997969133  
E-mail: grigoryeva.vita@mail.ru

I.I. SVIRIDENKO, D.V. SHEVELEV, V.F. TISHKOV, S.S. BEZOTOSNY, V.N. GRIGORIEVA

## THE EXPERIMENTAL SHF-FACILITY FOR THE DANGEROUS MEDICAL WASTE TREATMENT

**Abstract.** *The description presented of the experimental SHF-facility for the dangerous medical waste decontamination using SHF-technology which allows decreasing the waste volume and transforming them into the form suitable for long term disposal. The known methods and their disadvantages analyzed of the dangerous medical waste decontamination. The experimental results given of SHF-method applications, namely: SHF pyrolysis of raw medical substances, SHF pyrolysis gases destruction in plasma, and conditioning of solid ash residue. The photos presented of the experimental facility and its elements, and also of a different modes of plasma discharges in the plasmochemical pyrolysis gases destructor chamber and results of ash residues glass-like agglomeration using different glass forming additives. Shown that the method of SHF pyrolysis with consequent glass like agglomeration of ash residue is the optimal one to solve the task of dangerous medical waste decontamination, because does not produce the secondary waste and allows to obtain the stable substances completely safe for long term disposal.*

**Keywords:** *dangerous medical waste, plasma based SHF-destruction, high temperature agglomeration of ash residue with glass forming additives.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Beskontaktnaja utilizacija. [Electronic resource]. Access mode: // <https://rostec.ru/news/beskontaktnaya-utilizatsiya-kak-pererobotayut-kovidnyy-musor/> (accessed date: 17.12.2022).
2. Utilizacija othodov, obrazovavshihsja v hode borby s COVID-19. [Electronic resource]. Access mode: <https://news.un.org/ru/story/2022/02/1417662> (accessed date: 11.12.2022).
3. Ocenka upravljenja medicinskimi othodami v period pandemii COVID-19. PROON. – 2021. – 52 s.
4. Sanitarnye pravila i normy SanPiN 2.1.3684-21. «Sanitarno-jepidemiologicheskie trebovanija k sodержaniju territorij gorodskih i selskih poselenij, k vodnym ob#ektam, pitevoj vode i pitevomu vodosnabzheniju naselenija, atmosfernomu vozduhu, pochvam, zhilym pomeshhenijam, jekspluatácii proizvodstvennyh, obshhestvennyh pomeshhenij, organizacii i provedeniju sanitarno-protivojepidemiceskikh (profilakticheskikh) meroprijatij». Utv. postanovleniem Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha RF ot 28.01.2021, № 3. Vved. v dejstvie s 01.03.2021.

5. Oborudovanie dlja utilizacii medicinskih othodov. [Electronic resource]. Access mode: <https://news.solidwaste.ru/2021/09/oborudovanie-dlya-utilizatsii-meditsinskih-othodov/> (accessed date: 05.10.2022).
6. Balakaeva A.V., Rusakov N.V. Sravnitel'naja ocenka jeffektivnosti ustanovok obezrazhivaniya medicinskih othodov. – Gigiena i sanitarija. – 2016. – 95(7). – S. 614 – 616.
7. Holjavko T.I. Faktory negativnogo vozdejstviya medicinskih othodov pri ih utilizacii. Nauka i sovremennost, 2014. – S. 11–15
8. Bezopasnoe upravlenie othodami mediko-sanitarnoj dejatel'nosti. Kratkaja informacija Vsemirnaja organizacija zdavoohraneniya, 2017. – 32 s.
9. Rumak V.S., Khan Ch.K., Kuznecov A.N., Sofronov G.A., Pavlov D.S. Vozdejstvie dioksinov na okruzhajushuju sredu i zdorove cheloveka // Vestnik Rossijskoj akademii nauk, 2009. – № 2. – S. 124-130.
10. Obosnovanie tehnologicheskikh processov, realizujushhih kompleksnyj metod obezvezhivaniya, destrucii i kondicionirovaniya opasnyh medicinskih othodov na osnove ob#mnogo bezjelektrodnogo SVCh-razrjad: Otchet o NIR (itogovyy) / Sevastop. gos. un-t (SevGU); rukovoditel I.I. Sviridenko. – Sevastopol, 2021. – 58 s.
11. Golubev V.P. Primenenie innovacionnogo metoda SVCh-izlucheniya dlja piroliticheskogo obezvezhivaniya medicinskih othodov / V.P. Golubev, T.S. Blagoveshhenskaja // Jekologija na predpriyatii, 2015. – № 5. – S. 29-37.
12. Ustanovka UOMO-01/150 dlja obezrazhivaniya medicinskih othodov. [Electronic resource]. Access mode: <https://www.mediko.ru/index.php?id=9658> (accessed date: 04.12.2022).
13. Ispolzovanie jelektromagnitnogo izlucheniya sverh'vysokoj chastoty dlja obezrazhivaniya inficirovannyh medicinskih othodov. Metodicheskie rekomendacii MP 02.007-06. Data vvedeniya: 6 maja 2006 g.
14. Soroka N.V. Osobennosti primeneniya tehnologii VCh i SVCh plazmennogo termoliza tverdyh bytovykh othodov / N.V. Soroka, K.A. Korsunov // Vestnik Luganskogo gosudarstvennogo Universiteta im. V. Dalja, 2021. – № 5(47). – S. 211–216.
15. Mossje A.L. Mobil'naja plazmennaja ustanovka dlja unichtozheniya toksichnyh othodov / A.L. Mossje, G.Je. Savchenko, V.V. Savchin, A.V. Lozhechnik / Himija i himicheskaja tehnologija, 2012. – Tom 55. – Vyp. 4. – S. 56–62.
16. Mossje A.L., Savchin V.V. Plazmennye tehnologii i ustrojstva dlja pererabotki othodov. – Belaruskaja navuka, 2015. – 412 s.
17. Jalda K.D., Rybakova E.V. Mikrovolnovoe obezrazhivanie medicinskih othodov klassa B i V na primere SVCh-ustanovki «Sterius». Remedium Privolzhje, 2016. – № 1 (141) janvar-fevral. – S. 34–35.

**Sviridenko Igor Ivanovich**  
Sevastopol State University,  
Associate Professor, Department of  
Ship Power Stations and  
Constructions,  
Ph.D,  
University st., 33, Sevastopol,  
Russian Federation, 299053  
tel. +8692543086  
E-mail: i.sviridenko@mail.ru

**Shevelev Dmitry Vladimirovich**  
All-Russian Research Institute for  
Nuclear Power Plants Operation JSC,  
Lead Engineer, Ph.D,  
Ferganskaya st., 25, Moscow,  
Russian Federation, 109507  
tel. +74997969133  
E-mail: ontps@mail.ru

**Tishkov Vitaly Fedorovich**  
All-Russian Research Institute for  
Nuclear Power Plants Operation JSC,  
Department head  
Ferganskaya st., 25, Moscow,  
Russian Federation, 109507  
tel. +74997969133  
E-mail: v.tishkov@mail.ru

**Bezotosny Sergey Sergeevich**  
All-Russian Research Institute for  
Nuclear Power Plants Operation JSC,  
Lead Engineer,  
Ferganskaya st., 25, Moscow,  
Russian Federation, 109507  
tel. +74997969133  
E-mail: 79787391497@yandex.ru

**Grigorieva Vita Nikolaevna**  
All-Russian Research Institute for  
Nuclear Power Plants Operation JSC,  
Chief Specialist, Ph.D,  
Ferganskaya st., 25, Moscow,  
Russian Federation, 109507  
tel. +74997969133  
E-mail: grigoryeva.vita@mail.ru

© И.И. Свириденко, Д.В. Шевелев, В.Ф. Тишков, С.С. Безотосный, В.Н. Григорьева, 2023

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

УДК 519.876.2:658.5

DOI: 10.33979/2073-7408-2023-358-2-182-187

А.Г. ИВАХНЕНКО, О.В. АНИКЕЕВА, О.Н. КИРИЛЛОВ

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА ПРИ НЕЛИНЕЙНОМ ХАРАКТЕРЕ ПОТЕНЦИАЛА ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

**Аннотация.** Представлена нелинейная модель динамики системы менеджмента качества, учитывающая квадратическую нелинейность потенциала предприятия. Представлены результаты моделирования для двух целей в области качества, включающие собственные значения матрицы Якоби, коэффициенты при управляющих ступенчатых воздействиях, значения этих целей, при изменении положения экстремумов потенциала для рассмотренных целей. Выявлены значения параметров системы, при которых характер ее поведения соответствует линейной модели. Установлено, что использование подхода к определению коэффициентов при управляющих воздействиях, применяемого в линейных моделях и основанного на использовании статической характеристики системы, может приводить к появлению отрицательных значений этих коэффициентов. Определены перспективы дальнейших исследований на основе скрытого управления при использовании системы сбалансированных показателей и соответствием значений целей потенциалу предприятия.

**Ключевые слова:** цели в области качества, нелинейный потенциал, устойчивость.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анцев В.Ю., Иноземцев А.Н. Всеобщее управление качеством: учебное пособие. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2005. – 243 с.
2. Козловский В.Н. Производственная система как источник развития / В.Н. Козловский, Д.И. Благовещенский, Д.И. Панюков, Д.В. Айдаров // Стандарты и качество. – 2021. – №6. – С. 92-97.
3. Ивахненко А.Г. Взаимодействие подсистем предприятий при целевом управлении качеством продукции / А.Г. Ивахненко, О.В. Аникеева // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2020. - №11. – С. 44-51. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-11-44-51.
4. Klochkov Y., Klochkova E., Kiyatkina E., Skripnuk D., Aydarov D. Development of Methods for Business Modeling. 2017 International Conference on Infocom Technologies and Unmanned Systems (ICTUS2017), Dec. 18-20, 2017, ADET, Amity University Dubai, UAE.
5. Barnett, W., Serletis, A., Serletis, D., 2015. Nonlinear and complex dynamics in economics. *Macroeconomic Dynamics*, 19(8), 1749-1779. doi:10.1017/S1365100514000091.
6. Roca-Puig, V., Escrig-Tena, A.B., 2017. Examining nonlinear relationships between quality management and financial performance, *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 34 No. 7, pp. 1094-1110. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-02-2016-0014>.
7. Экономика и менеджмент в условиях нелинейной динамики / под ред. д-ра экон. наук, проф. А.В. Бабкина. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. – 773 с.
8. Аникеева, О.В. Верификация линейной модели динамики качества при исследовании целенаправленной деятельности промышленного предприятия / О.В. Аникеева, А.Г. Ивахненко, М.Л. Сторублев // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2020. – № 3. – С. 154–163. – DOI: 10.33979/2073-7408-2020-341-3-154-163.
9. Ivakhnenko, A., Anikeeva, O., Erenkov, O., 2021. Ivakhnenko, A., Anikeeva, O., Erenkov, O., 2021. Optimum control of purpose activities in the area of quality based on a linear model of dynamics in state space. *J. Phys. Conf. Ser.* 2131 052014 (2021).
10. Максимова Н.А. Разработка методов и моделей принятия оптимальных управленческих решений для обеспечения организационной устойчивости предприятий текстильной и легкой промышленности на базе совершенствования организации складского хозяйства: дисс. ... канд. техн. наук: 05.02.22. Санкт-Петербург. – 2019. – 154 с.
11. Аникеева, О.В. Условия достижимости целей в области качества промышленных предприятий при скрытом управлении их социально-экономическими системами / О.В. Аникеева, А.Г. Ивахненко // *Известия ТулГУ. Технические науки*. – 2022. - №4. С. 383-391.

**Ивахненко Александр Геннадьевич**  
ФГБОУ ВО «Юго-Западный  
государственный университет», г.  
Курск  
Д-р. техн. наук, профессор,  
профессор кафедры МТиО  
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября,  
94  
Тел. 8-960-676-15-90  
E-mail: ivakhnenko2002@mail.ru

**Аникеева Олеся Владимировна**  
ООО «Курский аккумуляторный  
завод», г. Курск  
Канд. техн. наук, доцент,  
специалист по управлению  
качеством  
305026, г. Курск, пр. Ленинского  
комсомола, 40  
Тел. 8-952-496-46-18  
E-mail: olesya-anikeeva@yandex.ru

**Кириллов Олег Николаевич**  
ФГБОУ ВО «Воронежский  
государственный технический  
университет», г. Воронеж  
Д-р. техн. наук, профессор,  
профессор кафедры ТМ  
394006, г. Воронеж, ул. 20-  
летия Октября, 84  
Тел. 8-908-147-24-13

## INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF THE QUALITY MANAGEMENT SYSTEM WITH THE NONLINEAR NATURE OF THE POTENTIAL OF AN INDUSTRIAL ENTERPRISE

**Abstract.** A nonlinear model of the dynamics of the quality management system is presented, taking into account the quadratic nonlinearity of the enterprise potential. The results of modeling for two quality goals are presented, including the eigenvalues of the Jacobi matrix, coefficients for control step actions, the values of these goals, when changing the position of the extremes of the potential for the considered goals. The values of the system parameters at which the nature of its behavior corresponds to the linear model are revealed. It is established that the use of the approach to the determination of coefficients under control actions, used in linear models and based on the use of static characteristics of the system, can lead to the appearance of negative values of these coefficients. Prospects for further research on the basis of hidden management using a system of balanced indicators and matching the values of goals to the potential of the enterprise are determined.

**Keywords:** quality objectives, nonlinear potential, sustainability.

### BIBLIOGRAPHY

1. Ancev V.YU., Inozemcev A.N. Vseobshchee upravlenie kachestvom: uchebnoe posobie. – Tula: Izd-vo TulGU, 2005. – 243 s.
2. Kozlovskij V.N. Proizvodstvennaya sistema kak istochnik razvitiya / V.N. Kozlovskij, D.I. Blagoveshchenskij, D.I. Panyukov, D.V. Ajdarov // Standarty i kachestvo. – 2021. – №6. – S. 92-97.
3. Ivahnenko A.G. Vzaimodejstvie podsistem predpriyatij pri celevom upravlenii kachestvom produkcii / A.G. Ivahnenko, O.V. Anikeeva // Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2020. – №11. – S. 44-51. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-11-44-51.
4. Klochkov Y., Klochkova E., Kiyatkina E., Skripnuk D., Aydarov D. Development of Methods for Business Modeling. 2017 International Conference on Infocom Technologies and Unmanned Systems (ICTUS2017), Dec. 18-20, 2017, ADET, Amity University Dubai, UAE.
5. Barnett, W., Serletis, A., Serletis, D., 2015. Nonlinear and complex dynamics in economics. *Macroeconomic Dynamics*, 19(8), 1749-1779. doi:10.1017/S1365100514000091.
6. Roca-Puig, V., Escrig-Tena, A.B., 2017. Examining nonlinear relationships between quality management and financial performance, *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 34 No. 7, pp. 1094-1110. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-02-2016-0014>.
7. *Ekonomika i menedzhment v usloviyah nelinejnoj dinamiki / pod red. d-ra ekon. nauk, prof. A.V. Babkina.* – SPb.: Izd-vo Politekh. un-ta, 2017. – 773 s.
8. Anikeeva, O.V. Verifikaciya linejnoj modeli dinamiki kachestva pri issledovanii celenapravlennoj deyatel'nosti promyshlennogo predpriyatiya / O.V. Anikeeva, A.G. Ivahnenko, M.L. Storublev // *Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii.* – 2020. – № 3. – S. 154–163. – DOI: 10.33979/2073-7408-2020-341-3-154-163.
9. Ivakhnenko, A., Anikeeva, O., Erenkov, O., 2021. Ivakhnenko, A., Anikeeva, O., Erenkov, O., 2021. Optimum control of purpose activities in the area of quality based on a linear model of dynamics in state space. *J. Phys. Conf. Ser.* 2131 052014 (2021).
10. Maksimova N.A. Razrabotka metodov i modelej prinyatiya optimalnyh upravlencheskih reshenij dlya obespecheniya organizacionnoj ustojchivosti predpriyatij tekstilnoj i legkoj promyshlennosti na baze sovershenstvovaniya organizacii skladskogo hozyajstva: diss. ... kand. tekhn. nauk: 05.02.22. Sankt-Peterburg. – 2019. – 154 s.
11. Anikeeva, O.V. Usloviya dostizhimosti celej v oblasti kachestva promyshlennyh predpriyatij pri skrytom upravlenii ih socialno-ekonomicheskimi sistemami / O.V. Anikeeva, A.G. Ivahnenko // *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki.* – 2022. – №4. – S. 383-391.

**Ivakhnenko Alexander Gennadievich**  
Southwest State University  
Doctor of Sciences Engineering,  
Professor, Professor of the department  
ET&E  
305040, Kursk, 50 Let Oktyabrya  
Street, 94  
Tel. 8-960-676-15-90  
E-mail: ivakhnenko2002@mail.ru

**Anikeeva Olesya Vladimirovna**  
Kursk Battery Plant  
Candidate of Science Engineering,  
Associate Professor, Quality  
Management Specialist  
305026, Kursk, Leninsky Komsomol  
Avenue, 40  
Tel. 8-952-496-46-18  
E-mail: olesya-anikeeva@yandex.ru

**Kirillov Oleg Nikolaevich**  
Voronezh State Technical  
University  
Doctor of Sciences Engineering,  
Professor, Professor of the  
department MET  
394006, Voronezh, 20 Let  
Oktyabrya Street, 84  
Tel. 8-908-147-24-13

© А.Г. Ивахненко, О.В. Аникеева, О.Н. Кириллов, 2023

М.Г. БАЛАШОВ, В.В. ЖИБОЕДОВ, Г.В. ЛЕКАРЕВ

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХОДКОСТИ СУДОВ

**Аннотация.** Одной из областей машиностроения является судостроение и как следствие связанные с ним задачи проектирования судов и объектов океанотехники. В статье рассмотрено использование испытаний физической модели при определении сопротивления воды на движение модели судна на примере полупогружного плавучего крана на тихой воде в транспортном положении. Исследования проведены в опытовом бассейне Севастопольского государственного университета. Выполненные прогоны физической модели позволили построить графики зависимости коэффициента сопротивления от числа Фруда. По полученным графикам можно оценить мощность энергетической установки маршевых двигателей полупогружного плавучего крана на начальных стадиях проектирования.

**Ключевые слова:** судно, модельные испытания, приборы, бассейн, сопротивление воды, критерии подобия, крановое судно, коэффициент сопротивления.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисов Р.В. Морские инженерные сооружения / Р.В. Борисов. В 2 ч. Ч. 1. – Морские буровые установки – СПб.: Судостроение, 2003 – 346 с.
2. Войткунский Я.И. Справочник по теории корабля / Я.И. Войткунский, Р.Я. Першиц, И.А.Титов. – Л.: Судпромгиз, 1960. – 440 с.
3. Зиньковский-Горбатенко В.Г. Моделирование сопротивления судов в малом опытовом бассейне / В.Г. Зиньковский-Горбатенко, Г.Н. Грищенко // Вестник СевНТУ. Сер. Механика, энергетика, экология: сб. науч. тр. – Севастополь, 2005. – Вып. 75. – С.35 – 39.
4. Жинкин, В. Б. Теория и устройство корабля: учебник для бакалавриата и специалитета / В. Б. Жинкин. — 5-е изд., испр. и доп. — Москва: Издательство Юрайт, 2019. — 407 с. — (Серия: Бакалавр и специалист). — ISBN 978-5-534-08977-6. — Текст: электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <https://www.biblio-online.ru/bcode/442109>.

**Балашов Михаил Георгиевич**  
Севастопольский  
государственный университет, г.  
Севастополь  
Кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Океанотехника  
и кораблестроение»  
299053, г. Севастополь,  
ул. Университетская, 33  
Ph.: 8(978) 838–27–60  
E–mail: 79788382760@yandex.ru

**Жибоедов Вячеслав Владимирович**  
Севастопольский государственный  
университет, г. Севастополь  
Кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Океанотехника и  
кораблестроение»  
299053, г. Севастополь,  
ул. Университетская, 33  
Ph.: 8(978) 747–25–01  
E–mail: frog\_ii@mail.ru

**Лекарев Геннадий Викторович**  
Севастопольский государственный  
университет, г. Севастополь  
Кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Океанотехника и  
кораблестроение»  
299053, г. Севастополь,  
ул. Университетская, 33  
Ph.: 8(978) 103–80–88  
E–mail: glek@yandex.ru

M.G. BALASHOV, V.V. GIBOEDOV, G.V. LEKAREV

## MODEL RESEARCH OF PROPULSION OF SEMISUBMERCIBLE FLOATING CRANES

**Abstract.** The article describes the effect on the water resistance of the movement vessel of the model of a semi-submersible floating crane on quiet water in the working transport positions and different course angle. The research was carried out in the experimental pool of Sevastopol state University. The model runs made it possible to plot the dependence of the resistance coefficient on the Froude number. Each of the presented graphs refers to a certain horizontal clearance and exchange rate angle, as well as the number of intermediate stabilization columns. On the resulting graph it is possible to evaluate the power plant and main thrusters the semi-submersible floating crane selected design scheme at the initial design stages.

**Keywords:** vessel, model tests, instruments, pool, water resistance, similarity criteria, crane vessel, resistance coefficient.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Borisov R.V. Morskie inzhenernye sooruzheniya / R.V. Borisov. V 2 ch. Ch. 1. – Morskie burovye ustanovki – SPb.:Sudostroenie, 2003 – 346 s.
2. Voytkunskiy Ya.I. Spravochnik po teorii korablya / Ya.I. Voytkunskiy, R.Ya. Pershits, I.A.Titov. – L.: Sudpromgiz, 1960. – 440 s.
3. Zinkovskiy-Gorbatenko V.G. Modelirovanie soprotivleniya sudov v malom opytovom bassejne / V.G. Zinkovskiy-Gorbatenko, G.N. Grishchenko // Vestnik SevNTU. Ser. Mekhanika, energetika, ekologiya: sb. nauch. tr. – Sevastopol, 2005. – Vyp. 75. – S.35 – 39.
4. Zhinkin, V. B. Theory and device of the ship: textbook for undergraduate and specialty / V. B. Zhinkin. — 5th ed., ispr. and add. — Moscow: Yurayt Publishing House, 2019. — 407 p. — (Series: Bachelor and Specialist). — ISBN 978-5-534-08977-6. — Text: electronic // EBS Yurayt [website]. — URL: <https://www.biblio-online.ru/bcode/442109>.

**Balashov Michael Georgievich**

Sevastopol State University,  
Sevastopol  
Ph.D., assistant professor of  
Department of Ocean Engineering  
and Shipbuilding  
299053, Sevastopol,  
Universitetskaya street, 33  
Ph.: 8(978) 838–27–60  
E-mail: 79788382760@yandex.ru

**Giboedov Vyacheslav Vladimirovich**

Sevastopol State University, Sevastopol  
Ph.D., assistant professor of Department  
of Ocean Engineering and Shipbuilding  
299053, Sevastopol, Universitetskaya  
street, 33  
Ph.: 8(978) 747–25–01  
E-mail: frog\_ii@mail.ru

**Lekarev Gennadiy Viktorovich**

Sevastopol State University,  
Sevastopol  
Ph.D., assistant professor of  
Department of Ocean Engineering  
and Shipbuilding  
299053, Sevastopol, Universitetskaya  
street, 33  
Ph.: 8(978) 103–80–88  
E-mail: glek@yandex.ru

© М.Г. Балашов, В.В. Жибоедов, Г.В. Лекарев, 2023

*Адрес издателя:*

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»  
302026, Орловская область, г. Орел, ул. Комсомольская, 95  
Тел. (4862) 75–13–18  
<http://oreluniver.ru>  
E-mail: [info@oreluniver.ru](mailto:info@oreluniver.ru)

*Адрес редакции:*

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»  
302030, Орловская область, г. Орел, ул. Московская, 34  
+7 (905) 169 88 99

<https://oreluniver.ru/science/journal/fipptt>  
E-mail: [radsu@rambler.ru](mailto:radsu@rambler.ru)

Материалы статей печатаются в авторской редакции

Право использования произведений предоставлено авторами на основании  
п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации

Технический редактор Тюхта А.В.  
Компьютерная верстка Тюхта А.В.

Подписано в печать 21.04.2023 г.  
Дата выхода в свет г. 05.05.2023 г.  
Формат 70X108/16. Усл. печ. л. 12,25  
Цена свободная. Тираж 1000 экз.  
Заказ №138

Отпечатано с готового оригинал-макета  
на полиграфической базе ОГУ имени И.С. Тургенева  
302026, Орловская область, г. Орёл, ул. Комсомольская, д. 95