

Том 22, № 10

2018

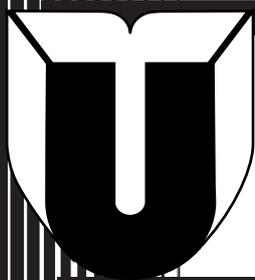
ISSN 1814-3520 (print)  
ISSN 2500-1590 (online)

# ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



# ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета, 2018

Том 22, № 10

2018

Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета

## Редакционная коллегия

**КОРНЯКОВ М.В.**, доктор технических наук, ректор Иркутского национального исследовательского технического университета, главный редактор (г. Иркутск, Россия)

**НЕМЧИНОВА Н.В.**, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой металлургии цветных металлов Иркутского национального исследовательского технического университета, заместитель главного редактора (г. Иркутск, Россия)

**АЗАРОВ В.Н.**, доктор технических наук, профессор Московского института электроники и математики Национального исследовательского университета Высшей школы экономики (г. Москва, Россия)

**БАЖИН В.Ю.**, доктор технических наук, декан факультета переработки минерального сырья Санкт-Петербургского горного университета (г. Санкт-Петербург, Россия)

**БОРОВИКОВ Ю.С.**, доктор технических наук, проректор Национального исследовательского Томского политехнического университета (г. Томск, Россия)

**ВОРОПАЙ Н.И.**, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, научный руководитель Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)

**ЗАЙДЕС С.А.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой машиностроительных технологий и материалов Иркутского национального исследовательского технического университета (г. Иркутск, Россия)

**МАМЯЧЕНКОВ С.В.**, доктор технических наук, профессор Уральского Федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург, Россия)

**ПАНТЕЛЕЕВ В.И.**, доктор технических наук, профессор Сибирского федерального университета (г. Красноярск, Россия)

**ПЕТРОВ А.В.**, доктор технических наук, профессор Иркутского национального исследовательского технического университета (г. Иркутск, Россия)

**СИТНИК Л.Е.**, доктор-инженер, профессор, заведующий кафедрой Транспортной техники Вроцлавского политехнического университета (Польша)

**СТЫЧИНСКИ З.А.**, профессор Университета Отто-фон-Герике (г. Магдебург, Германия)

**СУСЛОВ К.В.**, кандидат технических наук, профессор Иркутского национального исследовательского технического университета (г. Иркутск, Россия)

**ТИХОМИРОВ А.А.**, доктор экономических наук, профессор университета ИНХА (г. Инчон, Республика Корея)

**ФЕДОТОВ А.И.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автомобильного транспорта Иркутского национального исследовательского технического университета (г. Иркутск, Россия)

**ШОЛЬТЕС Бертольд**, директор Института металловедения Кассельского университета (г. Кассель, Германия)

Журнал основан в 1997 г.

Периодичность издания – ежемесячно

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Свидетельство ПИ № ФС77-62813 от 18 августа 2015 г.

Учредитель Иркутский национальный исследовательский технический университет

Подписной индекс в Каталоге  
русской прессы – 38237

Адрес редакции, учредителя и издателя:  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.  
e-mail: pgr@istu.edu

# PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

Vol. 22, No. 10

2018

Publishers of Irkutsk National Research Technical University

## Editorial board

**KORNIKOV M.V.**, Dr. Sc. in Engineering, Rector  
Rector of Irkutsk National Research Technical  
University, Editor-in-Chief (Irkutsk, Russia)

**NEMCHINOVA N.V.**, Doctor of technical sciences,  
Professor, Head of the Department of Non-Ferrous  
Metals Metallurgy of Irkutsk National Research  
Technical University, Deputy Editor in Chief  
(Irkutsk, Russia)

**AZAROV V.N.**, Doctor of technical sciences,  
Professor of Moscow Institute of Electronics and  
Mathematics of Higher School of Economics  
National Research University (Moscow, Russia)

**BAZHIN V.Y.**, Doctor of technical sciences, Dean of  
the Faculty of Mineral Raw Materials Processing of  
the St. Petersburg Mining University (Saint  
Petersburg Mining University) (Saint Petersburg,  
Russia)

**BOROVIKOV Y.S.**, Doctor of technical sciences,  
Pro-Rector of National Research Tomsk  
Polytechnic University (Tomsk, Russia)

**VOROPAI N.I.**, Corresponding Member of the  
Russian Academy of Sciences, Doctor of technical  
sciences, Professor, Honored Scientist of the  
Russian Federation, Scientific Advisor of Melentiev  
Energy Systems Institute SB RAS (Irkutsk, Russia)

**ZAIDES S.A.**, Doctor of technical sciences,  
Professor, Head of the Department of Machine-  
Building Technologies and Materials of Irkutsk  
National Research Technical University (Irkutsk,  
Russia)

**MAMYACHENKOV S.V.**, Doctor of technical  
sciences, Professor of the Ural Federal University  
named after the first President of Russia B.N.  
Yeltsin (Ekaterinburg, Russia)

**PANTELEEV V.I.**, Doctor of technical sciences,  
Professor of Siberian Federal University  
(Krasnoyarsk, Russia)

**PETROV A.V.**, Doctor of technical sciences,  
Professor of Irkutsk National Research Technical  
University (Irkutsk, Russia)

**SITNIK L.E.**, Doctor-Engineer, Professor, Head  
of the Department of Transport Technology of  
Wrocław University of Science and Technology  
(Poland)

**STYCHINSKI Z.A.**, Professor of the Otto von  
Guericke University (Magdeburg, Germany)

**SUSLOV K.V.**, Candidate of technical sciences,  
Professor of Irkutsk National Research Technical  
University (Irkutsk, Russia)

**TIKHOMIROV A.A.**, Doctor of Economics,  
Professor of the INHA University (Incheon,  
Republic of Korea)

**FEDOTOV A.I.**, Doctor of technical sciences,  
Professor, Head of the Department of Automobile  
Transport of Irkutsk National Research Technical  
University (Irkutsk, Russia)

**SCHOLTES BERTHOLT**, Director of the Institute  
of Metallurgy of the University of Kassel (Kassel,  
Germany)

The Journal was founded in 1997  
Frequency of publication – monthly  
The journal is registered with the Federal Agency for  
Supervision of Communications, Information Technologies  
and Mass Media (Roskomnadzor).  
Certificate of registration № ПИ № ФС77-62813  
of 18 August, 2015.  
Founder: Irkutsk National Research Technical University

Subscription index in the Catalog  
of the Russian Press – 38237

Address of the editorial Board, founder and publisher:  
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074  
e-mail: pgg@istu.edu

## СОДЕРЖАНИЕ



### Машиностроение и машиноведение

- Бохан В.В., Бобров С.П., Зубарев А.В.** Анализ разработки и исследования гибких сетчато-пластинчатых звукоизолирующих панелей..... 10
- Исаченко А.С., Журавлев Д.А.** Сокращение времени переналадки в цехах изготовления оснастки для заготовительно-штамповочного производства..... 20
- Макарук А.А., Пашков А.А., Хамаганов А.М., Самойленко О.В.** Определение внутренних силовых факторов, возникающих при упрочнении подкрепленных ребрами деталей..... 29



### Информатика, вычислительная техника и управление

- Логинов А.Ю., Розенбаум А.Е., Лимановская О.В., Вольман Д.В.** Способ хранения информации о составе машиностроительного изделия..... 38
- Овчинникова Н.И., Косарева А.В.** Композиционный метод оценки времени между отказами сельскохозяйственной уборочно-транспортной системы..... 46
- Петров А.В.** Имитация как основа технологии цифровых двойников.. 56
- Серышева И.А.** Фильтрация выбросов в задачах статической и динамической обработки данных в эталонах времени и частоты..... 67
- Харитонов В.А., Кривогино Д.Н.** Обоснование установления отношения строгого порядка в задаче ранжирования/выбора альтернатив строительного материала..... 78



### Энергетика

- Константинов Г.Г., Майоров Г.С.** Разработка и исследование автономного источника электроэнергии на базе микроГЭС и асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением..... 92
- Солопов Р.В., Ковженкин В.С., Вайтеленок Л.В.** Оценка погрешностей при работе фильтров Фурье в устройствах релейной защиты..... 117
- Якшин С.В.** Применение метода расщепления графа при оптимизации параметров тепловой сети..... 129

# ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

## СОДЕРЖАНИЕ

### Металлургия и материаловедение

- **Насонов Ф.А., Бухаров С.В.** Исследование влияния целевого модифицирования эпоксидных матриц и углепластиков на их основе на температуру в зоне резания при образовании отверстий..... 141
- **Мырзалиев Б.М., Ногаева К.А., Молмакова М.С.** Определение целесообразности гравитационного обогащения руды месторождения «Джамгыр»..... 153

### Транспорт

- **Зудов Г.Ю., Буслаева И.И., Лебедев М.П., Левин А.И.** Работоспособность автомобиля КАМАЗ в условиях криолитозоны..... 166
- **Кадията Э.Ч., Славцкий В.М., Курапин А.В., Салькин Е.А.** Сжимаемость пальмового масла и его смесей с дизельным топливом 178
- **Макаров И.Н.** Теоретико-методологический подход к разработке стратегии и инструментария оптимизации транспортных систем крупных городов и агломераций..... 189
- **Михайлов А.Ю, Попова Е.Л., Гайворонский И.Л.** Влияние урбанизации на социально-экономические аспекты транспортной и туристической отраслей региона..... 203
- **Новиков В.В., Поздеев А.В., Чумаков Д.А.** Экспериментальное исследование влияния дополнительного объема и демпфирующего устройства на свободные затухающие колебания диафрагменных пневматических рессор..... 212
- **Рябов И.М., Чернышов К.В., Поздеев А.В., Мухучев Ш.М., Мухидинов Ю.М.** Необходимость научно обоснованного выбора серии профиля шин при их замене для обеспечения безопасности..... 227
- **Федотов А.И., Тихов-Тинников Д.А., Барадиев В.С.** Эмпирические и теоретические предпосылки математической модели процесса функционирования сайлентблоков подвески АТС..... 239
- **Ядрошникова Г.Г., Шаламова О.А., Самойлова Е.В., Юркова Е.О.** Интегрированный логистический менеджмент на основе многокритериальной оценки технического состояния машин..... 248

### CONTENTS

	<b>Mechanical Engineering and Machine Science</b>	
	<b>Bokhan V.V., Bobrov S.P., Zubarev A.V.</b> Analysis of flexible mesh-plate soundproofing panel development and research.....	10
	<b>Isachenko A.S., Zhuravlev D.A.</b> Reduction of changeover time of blanking and die forging tooling in manufacturing workshops.....	20
	<b>Makaruk A.A., Pashkov, A.A. Khamaganov A.M., Samoilenko O.V.</b> Determination of internal force factors under ribbed part hardening.....	29
	<b>Information Science, Computer Engineering and Management</b>	
	<b>Loginov A.Yu., Rozenbaum A.E., Limanovskaya O.V., Volman D.V.</b> Method of storing information on engineering product composition.....	38
	<b>Ovchinnikova N.I., Kosareva A.V.</b> Composition estimation method of time between failures of agricultural harvesting and transport system.....	46
	<b>Petrov A.V.</b> Simulation as the basis of digital twin technology.....	56
	<b>Serysheva I.A.</b> Outlier filtration in problems of static and dynamic data processing in time and frequency standards.....	67
	<b>Kharitonov V.A., Krivogina D.N.</b> Rationale for establishing strict order relations in the problem of ranking / selecting alternatives of construction material.....	78
	<b>Power Engineering</b>	
	<b>Konstantinov G.G., Maiorov G.S.</b> Development and research of a stand alone power source based on micro HPP and induction generator with capacitor excitation.....	92
	<b>Solopov R.V., Kovzhenkin V.S., Vaitelenok L.V.</b> Error estimation under Fourier filter operation in protective relays.....	117
	<b>Yakshin S.V.</b> Application of graph splittance method when optimizing heating network parameters.....	129

# PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

## CONTENTS

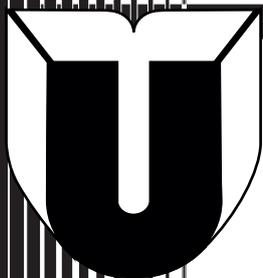
### Metallurgy and Materials Science

- **Nasonov F.A., Bukharov S.V.** Studying the effect of special modification of epoxy matrices and epoxy matrix-based carbon fiber composites on the temperature in the cutting zone under hole formation..... 141
- **Myrzaliev B.M., Nogaeva K.A., Molmakova M.S.** Determination of Jamgyr deposit ore gravity concentration feasibility..... 153

### Transport

- **Zudov G.Yu., Buslaeva I.I., Lebedev M.P., Levin A.I.** KAMAZ performance in conditions of permafrost region..... 166
- **Kadiata E.Ch., Slavutsky V.M., Kurapin A.V., Salykin E.A.** Compressibility of palm oil and its mixtures with diesel fuel..... 178
- **Makarov I.N.** Theoretical and methodological approach to the development of strategy and tools for large city and agglomeration transport system optimization..... 189
- **Mikhailov A.Yu., Popova E.L., Gaivoronskiy I.L.** Urbanization effects on social and economic development of regional tourism and transport industry..... 203
- **Novikov V.V., Pozdeev A.V., Chumakov D.A.** Experimental investigation of the effect of some additional volume and a dampering device on free damped oscillations of diaphragm air springs..... 212
- **Ryabov I.M., Chernyshov K.V., Pozdeev A.V., Mukhuchev Sh.M., Mukhidinov Yu.M.** Need for a scientifically based selection of tire profile series at tire replacement for safety provision..... 227
- **Fedotov A.I., Tikhov-Tinnikov D.A., Baradiev V.S.** Empirical and theoretical bases of the mathematical model of vehicle suspension silent blocks operation..... 239
- **Yadroshnikova G.G., Shalamova O.A., Samoiloa E.V., Yurkova E.O.** Integrated logistics management based on multi-criteria assessment of machinery technical condition..... 248





# ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

## Уважаемые читатели!

Предлагаем вашему вниманию очередной выпуск научного журнала «Вестник Иркутского государственного технического университета».

Журнал включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, утвержденный ВАК Минобрнауки России.

«Вестник ИргТУ» включен в международный каталог периодических изданий «UlrichsPeriodicals Directory», в базу данных EBSCO, в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU), представлен в электронной библиотеке «Cyberleninka», библиотеке Oxford, Directory of Open Access Journals (DOAJ) рассылается в Российскую книжную палату, ВИНТИ РАН, каждой статье присваивается цифровой индикатор DOI.

«Вестник ИргТУ» реферируется и рецензируется.

### Приглашаем вас к активному творческому сотрудничеству по научным направлениям:

- Машиностроение и машиноведение
- Информатика, вычислительная техника и управление
- Энергетика
- Metallургия и материаловедение
- Транспорт

**Редколлегия**



# PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

## Dear Readers!

We would like to bring to your attention the next issue of the scientific journal "Proceedings of Irkutsk State Technical University". The journal is included in the list of the leading scientific journals and publications, where the key scientific results of doctoral (candidate's) theses approved by the State Commission for Academic Degrees and Titles of the Russian Ministry of Education are to be published.

Proceedings of Irkutsk State Technical University ("Vestnik IrGTU") is included in the "UlrichsPeriodicals Directory", EBSCO database, Scientific electronic library (eLIBRARY.RU). It is presented in the e-library "Cyberleninka", University OXFORD, Scientific Indexing Services (SIS), Directory of Open Access Journals (DOAJ). It is sent to the Russian Book Chamber and All-Russian Institute for Scientific and Technical Information (VINITI) RAS. Each article is assigned a digital indicator DOI.

The journal "Proceedings of Irkutsk State Technical University" is abstracted and reviewed.

**•You are welcome for active and  
creative collaboration in the following  
fields:**

- Mechanical Engineering and Machine Science
- Information Science, Computer Engineering and Control
- Power Engineering
- Metallurgy and Materials Science
- Transport

**Editorial Board**





Обзорная статья / Review article

УДК 628.517+62-752

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-10-10-19>

## АНАЛИЗ РАЗРАБОТКИ И ИССЛЕДОВАНИЯ ГИБКИХ СЕТЧАТО-ПЛАСТИНЧАТЫХ ЗВУКОИЗОЛИРУЮЩИХ ПАНЕЛЕЙ

© В.В. Бохан<sup>1</sup>, С.П. Бобров<sup>2</sup>, А.В. Зубарев<sup>3</sup>

Федеральное государственное унитарное предприятие  
«Федеральный научно-производственный центр «Прогресс»,  
644018, Российская Федерация, г. Омск, ул. 5-я Кордная, 4.

**РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ.** Рассмотреть и проанализировать публикации по исследованию гибких сетчато-пластинчатых звукоизолирующих панелей за последнее десятилетие. **МЕТОДЫ.** Цель достигается путем анализа литературных источников, исследовательских работ. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Выделены сложившиеся тенденции технического развития гибких сетчато-пластинчатых звукоизолирующих панелей и их исследований. Важная тенденция связана с поиском рациональной основы методологии проектного расчета звукоизолирующей эффективности гибкой сетчато-пластинчатой звукоизолирующей панели. Обоснована актуальность дальнейшего теоретико-экспериментального исследования гибких сетчато-пластинчатых звукоизолирующих панелей и их модернизации. **ВЫВОДЫ.** Выявлены недостаточно освещенные в научной литературе вопросы по данной теме. Наибольший интерес представляют задача взаимодействия гибких сетчато-пластинчатых звукоизолирующих панелей с внешним полем упругих волн и задача регулирования их характеристик в условиях разработки, производства, наладки, эксплуатации и ремонта.

**Ключевые слова:** шум машин, защита от шума, звукоизоляция, сетчато-пластинчатая панель, металлическая сетка.

**Информация о статье.** Дата поступления 14 августа 2018 г.; дата принятия к печати 19 сентября 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 октября 2018 г.

**Формат цитирования.** Бохан В.В., Бобров С.П., Зубарев А.В. Анализ разработки и исследования гибких сетчато-пластинчатых звукоизолирующих панелей // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 10. С. 10–19. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-10-19

## ANALYSIS OF FLEXIBLE MESH-PLATE SOUNDPROOFING PANEL DEVELOPMENT AND RESEARCH

V.V. Bokhan, S.P. Bobrov, A.V. Zubarev

Federal State Unitary Enterprise “Federal Research-and-Production Center “Progress”,  
4, 5th Kordnaya St., Omsk, 644018, Russian Federation

**ABSTRACT.** The **PURPOSE** of the paper is to consider and analyze the past decade publications on the study of flexible mesh-plate soundproofing panels (MPSP). **METHODS.** The purpose is achieved through the analysis of literary sources and research works. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The current trends in the technical development of flexible mesh-plate soundproofing panels and their research are identified. An important trend is related to the search for a rational basis for the methodology of design calculation of MPSP sound insulation efficiency. The relevance of further theoretical

<sup>1</sup>Бохан Владимир Викторович, кандидат технических наук, научный сотрудник, e-mail: bohan\_vv@progress-omsk.ru  
Vladimir V. Bokhan, Candidate of technical sciences, Researcher, e-mail: bohan\_vv@progress-omsk.ru

<sup>2</sup>Бобров Сергей Петрович, кандидат технических наук, первый заместитель генерального директора, директор института, e-mail: info@progress-omsk.ru  
Sergey P. Bobrov, Candidate of technical sciences, First Deputy General Director, Director of the Institute, e-mail: info@progress-omsk.ru

<sup>3</sup>Зубарев Александр Викторович, кандидат технических наук, генеральный директор, e-mail: info@progress-omsk.ru  
Alexander V. Zubarev, Candidate of technical sciences, General Director, e-mail: info@progress-omsk.ru



and experimental study of flexible mesh-plate soundproofing panels and their modernization is substantiated. **CONCLUSIONS.** The insufficiently studied issues of flexible mesh-plate soundproofing panels have been revealed in the scientific literature. The interaction problem of MPSPP and an external field of elastic waves as well as the problem of MPSPP characteristics control under conditions of development, production, commissioning, operation and repair are of greatest interest.

**Keywords:** *machinery noise, noise protection, noise insulation, mesh-plate panel, wire mesh*

**Information about the article.** Received August 14, 2018; accepted for publication September 19, 2018; available online October 31, 2018.

**For citation.** Bokhan V.V., Bobrov S.P., Zubarev A.V. Analysis of flexible mesh-plate soundproofing panel development and research. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 10, pp. 10–19. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-10-19. (In Russian).

## Введение

Средства борьбы с шумом и вибрацией являются вспомогательной функциональной частью машин и установок. В рамках борьбы с повышенным уровнем воздушного шума, излучаемого энергетическим оборудованием, в отдельных случаях прибегают к установке звукоизолирующих панелей на пути распространения шума. Резонансы панели негативно сказываются на звукоизолирующей эффективности, поскольку в окрестности резонансной частоты наблюдается максимум частотной характеристики коэффициента прохождения звука. Снижение звукоизоляции наблюдается и на частоте волнового совпадения. Применение относительно гибких и тяжелых панелей обеспечивает уменьшение частоты основного тона собственных колебаний панели и увеличение частоты волнового совпадения панели за пределы рабочего диапазона частот.

Гибкая сетчато-пластинчатая звукоизолирующая панель (ГСП-панель) выполнена в виде отдельных квадратных металлических пластинок, закрепленных с помощью винтов на основании из металлической сетки, обложенной с обеих сторон несколькими слоями базальтовой ткани. Пластины на основании размещены с небольшим зазором, таким образом, жесткость панели определяется жесткостью основания. Получается достаточно гибкая в двух взаимно

перпендикулярных направлениях конструкция. При монтаже панель крепится по контуру к металлическому каркасу с помощью винтов.

ГСП-панели могут применяться, например, на железнодорожном и автомобильном транспорте для изоляции шума двигательных установок и других агрегатов, для изоляции шума турбогенераторов на АЭС, ГЭС, ТЭС, насосных агрегатов на нефте- и газоперекачивающих станциях. Благодаря высокой термостойкости панели сохраняют звукоизолирующую эффективность при значительном нагреве оборудования, в случаях опасности возгорания. Гибкость панелей позволяет проводить монтажные работы в труднодоступных местах.

Важные исследования ГСП-панелей, выполненные в разные годы, принадлежат следующим авторам: И.А. Трибельскому, В.А. Адонину и А.В. Зубареву (с 2007 г.), В.В. Бохану (с 2008 г.), С.А. Корнееву и М.А. Федоровой (с 2011 г.), С.А. Гракову (с 2014 г.), З.Н. Соколовскому и В.А. Тарану (с 2014 г.), Г.С. Русских (с 2015 г.), Э.А. Романенко (с 2017 г.).

Для дальнейшей модернизации конструкции и теоретико-экспериментальных исследований необходимо выделить сложившиеся тенденции технического развития ГСП-панелей.



## Основное содержание проведенных исследований

Разработка ГСП-панелей была начата в 2007 г. Перед коллективом института была поставлена задача снижения уровня шумового воздействия, обусловленного работой энергетического оборудования. Были заданы погонная масса панели и ее габаритные размеры. Требование «небольшого» модуля упругости материала панели породило образ панели как «тяжелой тряпки». Чтобы удовлетворить этим требованиям, было решено выполнить панель из квадратных металлических пластин необходимой толщины, скрепленных с помощью тонкой проволоки (множество проволочек). Но это техническое решение было нетехнологичным, и зародилась идея крепить металлические пластины на гибком основании из плетеной металлической сетки. С целью исключения прохождения звука сквозь ячейки металлической сетки, а также обеспечения нужной огнестойкости было предложено использовать базальтовую ткань. В 2007 г. была оперативно оформлена и в августе подана заявка на изобретение «панель звукоизолирующая» [1].

Сущность изобретения заключается в том, что звукоизолирующая панель выполнена в виде слоистой структурированной конструкции из материалов с различными физико-механическими свойствами. Квадратные металлические пластины установлены с двух сторон на плетеной сетке (по ГОСТ 3826-82)<sup>4</sup>, обложенной базальтовой тканью. Пластины, расположенные с разных сторон основания, стянуты друг с другом при помощи четырех винтов с потайной головкой. Боковые поверхности пластин имеют прямые скосы, направленные к основанию панели.

Этот первый вариант ГСП-панели, в целом удовлетворяющий предъявленным требованиям, все еще имел высокий потенциал усовершенствования. После доработки была оформлена и подана вторая заявка на изобретение [2]. Теперь грани ме-

таллических пластин в составе ГСП-панели скруглены радиусом 2 мм. Это, в отличие от первоначального конструктивного варианта пластинок со скосом [1], обеспечивает более равномерное распределение механических напряжений в материале основания и, соответственно, устранение концентраторов напряжений (особенно при динамических нагрузках), как следствие, повышение износостойкости основания панели и обеспечение заданного срока службы изделия. Кроме того, по сравнению с пластинкой со скосом, пластинка со скруглением позволяет добиться лучшей равномерности антикоррозионного покрытия на ее поверхности.

В ходе серии экспериментов проявилось существенное влияние типа плетения базальтовой ткани в основании ГСП-панели: звукоизолирующая эффективность резко снижается при использовании ткани с плетением волокон типа «Сатин» по сравнению с использованием ткани с плетением волокон типа «Полотно». Звукоизолирующая эффективность падает в среднем на 14 дБ. Для сатинового плетения характерна большая приведенная площадь щелей между переплетенными нитями, и поэтому такая ткань является более звукопрозрачной.

Пропитка базальтовой ткани специальным составом позволяет ввести дополнительные вязкоупругие связи между волокнами. Это приводит к росту диссипативных потерь при колебаниях. Кроме того, данное решение обеспечивает достаточно ровную кромку материала основания ГСП-панели после выполнения реза (технологическая операция). Дополнительно в местах реза панели проводят обработку кромки основания лаком, что предотвращает распускание базальтовой ткани.

Результаты исследований, проведенных в период разработки, до подтверждения статуса патентов на изобретение не публиковались, и часть из них не опубликована в настоящее время.

<sup>4</sup>ГОСТ 3826-82 Сетки проволочные тканые с квадратными ячейками. Введ. 1984-01-01. М.: Изд-во стандартов, 2003. / GOST 3826-82 Wire cloth mesh with square cells. Introduced 1 January 1984. M.: Standards Publ., 2003



В работах [3, 4] рассмотрена полоса из 15-ти пластинок, первая и последняя пластинки жестко закреплены. Предложена математическая модель статического прогиба и малых поперечных колебаний полосы. Используется расчетная схема, в которой пластинки связаны последовательно друг с другом нитями, не испытывающими изгиб и кручение, а только растяжение и сжатие. У каждой пластинки по три степени свободы. В [4] получены значения обобщенных координат в положении статического равновесия и значения собственных частот для одного набора конструктивных параметров.

В статье [5] предложен метод измерения звукоизоляции панелей с использованием акустического интерферометра, базирующийся на прямом измерении параметров акустических волн по обеим сторонам исследуемой панели по всей длине интерферометра. Метод обоснован теоретически и экспериментально (на примере стального листа). Приведены результаты численного моделирования акустического интерферометра методом конечных элементов. Данный метод использовался при экспериментальном исследовании ГСП-панели в диапазоне низких звуковых частот<sup>5</sup>.

В [6] рассмотрено упругопластическое деформирование проволочек металлической сетки в основе ГСП-панели при действии удара вдоль ее плоскости. Применен критерий разрушения Новожилова-Кадашевича. Приведены результаты численного решения задачи о свободных колебаниях после удара без учета затухания. Показано наличие остаточной деформации проволочек после удара. Из расчета следует, что пластическое деформирование происходит лишь в момент удара.

В диссертации<sup>5</sup> предложена математическая модель механических колебаний ГСП-панели. Она представлена в виде дискретного множества инерционных масс, расположенных в одной плоскости в форме квадрата. Соседние массы соединены между собой балками. У каждой массы по

одной степени свободы: перемещение перпендикулярно плоскости панели. Приведены расчетные значения резонансных частот и форм колебаний ГСП-панели для одного набора конструктивных параметров. Показано, что эти данные хорошо согласуются с экспериментальными данными. Предложен метод оценочного расчета звукоизоляции (спектральный показатель, характеризующий величину прохождения звука сквозь преграду) ГСП-панели, в котором сочетаются различные расчетные подходы, в том числе методы школы М.С. Седова. Разработана математическая конечно-элементная модель акустического интерферометра с ГСП-панелью для численного моделирования взаимодействия панели с акустической средой. Модель позволяет исследовать расчетным путем звукоизоляцию панелей различной конструкции. Результаты моделирования сопоставлены с экспериментальными данными, полученными по методу [5], расхождение незначительное (6 дБ).

В работе [7] представлены результаты экспериментального исследования фрагментов ГСП-панели размером 2x1 по определению резонансной частоты образца (для оценки жесткостных свойств основания ГСП-панели). Резонансная частота определялась по амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) при возбуждении образца силой переменной частоты (сигнал с линейной разверткой по частоте). Отмечено, что имеет место явление ползучести материалов основания панели. Впервые показано влияние на результат быстроты изменения частоты воздействия.

Использовать метод конечных элементов (МКЭ) для расчета ГСП-панели предложено в докладе [8]. Описана конечно-элементная модель, в которой пластинчатые конечные элементы (КЭ) соединены между собой балочными КЭ, учитывающими растяжение, сжатие, кручение, изгиб. Получены формы колебаний и значения собственных частот для одного набора кон-

<sup>5</sup>Бохан В.В. Динамика гибких сетчато-пластинчатых звукоизолирующих панелей: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06. Омск. 2013. 172 с. / Bokhan V.V. Dynamics of flexible mesh-plate soundproofing panels: Candidate's Dissertation in technical sciences: 01.02.06. Omsk. 2013. 172 p.



структивных параметров. Приводится сравнение с данными по [4].

Существенное различие механических характеристик сетки, используемой в основании ГСП-панели, в сравнении с характеристиками исходного материала впервые показано в работах [9, 10]. Проведены эксперименты по исследованию поведения металлической тканой сетки из нержавеющей стали 12Х18Н9Т при растяжении. Эффективный модуль упругости сетки из стали 12Х18Н9Т составил 13,7 ГПа.

Исследования, описанные в [7], продолжены и расширены в работе [11]. Здесь представлены результаты по восьми образцам, для каждого из которых проводят по 5 серий измерений в произвольном порядке. В рамках каждой серии измерений процедура снятия АЧХ повторяется многократно (50 раз) с заданным интервалом времени между измерениями. Результаты предыдущего исследования [7] не повторились полностью, получилась более разнообразная картина. Отмечено, что при многократном снятии АЧХ положение точки максимума на графике изменяется от измерения к измерению. Выполнена статистическая обработка результатов наблюдений. Обсуждается разброс результатов измерений.

Не приостанавливается усовершенствование ГСП-панели. Так, в патенте [12] предлагается способ упрощения процесса изготовления панели. Отмечается, что крепление пластин стяжными винтами усложняет процесс изготовления и не обеспечивает стабильного обжатия гибкого материала. Упрощение достигается за счет изготовления гнезд с выступами в сборочной плите для точной фиксации пластин при сборке и использования заклепок вытяжных для крепления пластин между собой вместо резьбовых соединений для упрощения процесса сборки.

Результаты исследования напряженно-деформированного состояния изогнутой под действием силы тяжести ГСП-па-

нели, поддерживаемой за один средний ряд пластинок, представлены в [13]. Такие нагрузки возникают при транспортировке или монтаже. Для расчета статического прогиба используется МКЭ. Пластины моделируются объемными КЭ, а основание панели – пластинчатыми КЭ. Для верификации расчетной модели проведен натурный эксперимент, расхождение с расчетом не превышает 5 %.

В работах [14, 15] экспериментально показано значительное расхождение полученных механических характеристик (модуль упругости и т.п.) проволоки из нержавеющей стали, используемой при плетении сетки для основания ГСП-панели, и самой стали, из которой изготавливают проволоку. Причина этого расхождения – остаточные напряжения от волочения. Предложен подход для расчетной оценки величины и области распределения остаточных напряжений и основных механических характеристик проволоки.

Разработке инженерной методики для оценки вибро- и ударопрочности посвящена диссертация<sup>6</sup>. Предложена математическая модель малых колебаний ГСП-панели размером 15x1 пластинки, на основе которых предложена методика оценки вибро- и ударопрочности. Предложена модификация исходной конструкции ГСП-панели (по [2]), теоретически обеспечивающая повышение ударной прочности. Предлагается увеличить ширину зазора между пластинками за счет пропилов в пластинках. Получены математические соотношения и зависимости, описывающие динамику и прочность ГСП-панели, необходимые для оценки ее вибро- и ударопрочности. Представлены результаты экспериментальных (статических и динамических) исследований механических характеристик тканой металлической сетки, входящей в состав ГСП-панели. После уточнения значения модуля упругости при растяжении эффективный модуль упругости сетки предлагается считать

<sup>6</sup>Федорова М.А. Расчетная оценка вибропрочности и ударопрочности пластинчато-сетчатой панели : дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06. Омск. 2016. 172 с. / Fedorova M.A. Estimate of mesh-plate panel vibration and shock resistance: Candidate's Dissertation in technical sciences: 01.02.06. Omsk. 2016. 172 p.



как 1/7 от табличного значения модуля упругости для стали, получаемого при стандартных испытаниях образцов на растяжение.

Возможность применения полимерных материалов в конструкции ГСП-панели рассмотрена в работе [16]. Представлены результаты численного моделирования (с помощью МКЭ) статического прогиба и резонансной частоты ГСП-панели размером 7x7 пластинок. Предложены варианты модификации исходной конструкции ГСП-панели [2] с использованием полимерных материалов при постоянстве погонной массы. Дан анализ распределения механических напряжений в основании ГСП-панели, выявлены концентраторы напряжений.

В статье [17] рассмотрен статический прогиб и верхняя оценка собственной частоты ГСП-панели с позиций дисциплины «Сопrotивление материалов». Предположено и обосновано свободное проскальзывание металлической сетки, зажатой пластинами в пакете с базальтовой тканью. На основе сопоставимости результатов расчета и эксперимента обосновывается правильность пренебрежения изгибной жесткостью сетки в основании ГСП-панели при построении математической модели (учитывается только деформация растяжения и сжатия).

В тезисах [18] обозначена предлагаемая математическая модель сетки на базе совокупности криволинейных стержней, учитывающая изгиб радиальных участков. Используется модуль упругости проволоки после волочения. Модель также учитывает влияние податливости поперечных нитей.

Проблема снижения уровней воздушного шума и вибрации от энергетического оборудования обсуждалась на Всероссийской научно-практической конференции «Защита от повышенного шума и вибрации». В докладе [19] описан комплексный подход, основанный на сбалансированном применении средств виброизоляции и звукоизоляции. Для снижения воздушного

шума от энергетического оборудования предлагается использовать ГСП-панели с закрепленными на них звукопоглощающими матами при обшивке каркаса звукоизолирующих кожухов.

В работе [20] предложен оригинальный способ оценки звукоизоляции ГСП-панели, учитывающий звукопрозрачность базальтовой ткани в ее основании. Способ основан на соотношениях для так называемых «акустических отверстий». Особенность способа заключается в определении приведенной площади акустического отверстия (щелей в ткани). В работе [21] этот подход развит и предложена модель учета низкочастотных колебаний ГСП-панели. Также здесь подобраны значения коэффициента для учета диффузности звукового поля.

Цикл публикаций [14, 15, 17–19] обобщен и осмыслен в диссертации<sup>7</sup>. Приведены результаты экспериментального исследования образцов исходной проволоки, а также проволоки, извлеченной из сетки, и самой сетки. Исследовано исходное напряженное состояние сетки (в состоянии поставки). Установлено наличие остаточных напряжений от волочения и напряжений от сборки сетки. Разработаны методика оценки величины напряжений в сетке на базе справочных данных исходной стали и испытаний образцов сетки. Исследовано отличие эффективного модуля сетки от модуля Юнга исходной проволоки и его зависимость от геометрических параметров сетки и остаточных напряжений волочения. Предложен способ расчета напряжений в проволоке сетки при ее растяжении. Исследовано деформированное состояние сетки в составе ГСП-панели, установлен факт скольжения сетки относительно пластин. Предложен способ расчета статического прогиба ГСП-панели как совокупности гибких нитей и оценки частоты первой формы собственных колебаний и ее зависимости от амплитуды колебаний. Предложена методика оценки

<sup>7</sup>Таран В.А. Расчетно-экспериментальное исследование несущей способности звукоизолирующей пластинчатосетчатой панели : дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06. Омск. 2017. 173 с. / Taran V.A. Calculated and experimental study of loading capacity of sound-insulating mesh-plate panels: Candidate's Dissertation in technical sciences: 01.02.06. Omsk. 2017. 173 p.



статической прочности и выносливости сетки в ГСП-панели.

Дальнейшее развитие способ оценки звукоизоляции ГСП-панели, изложенный в [20, 21], получил в работе [22], где дана методика расчета. Выделены параметры, ва-

рьюрование которых обеспечит повешение точности математической модели: количество пластин и ширина зазора между ними, толщина пластин и прочее. Подчеркивается важность учета положения исследуемой панели относительно вектора сил тяготения.

### Заключение

На основе проведенного анализа можно выделить сложившиеся тенденции технического развития ГСП-панелей и их исследований:

1) усовершенствование конструкции ГСП-панели и сопутствующих технологий ее изготовления и производства монтажных работ;

2) исследование статического прогиба и спектра собственных частот ГСП-панели при различных условиях;

3) исследование материалов, входящих в состав ГСП-панели, и степени их влияния на основные ее характеристики;

4) разработка методов оценки и расчета показателей статической, вибрационной и ударной прочности;

5) поиск рациональной основы методологии проектного расчета звукоизолирующей эффективности ГСП-панели.

В период с 2007 по 2018 г. было опубликовано 6 статей и 13 тезисов докладов, выдано три патента на изобретение, успешно защищено три диссертации на соискание ученой степени кандидата наук. Таким образом, можно заключить, что разработка и исследование ГСП-панелей являются актуальными.

В целом авторы считают недостаточно освещенным ряд существенных вопросов, среди них:

– колебания панели с учетом всех степеней свободы и нелинейности;

– взаимодействие ГСП-панели с внешним полем упругих волн;

– влияние монтажного провисания ГСП-панели.

Также следует отметить, что остались без внимания важные для теории и практики задачи, например:

– прохождение звуковой волны через ГСП-панель с учетом явления дифракции;

– оптимизация конструкции ГСП-панели;

– критичность технологических отклонений;

– настройка параметров и регулирование характеристик ГСП-панели в условиях разработки, производства, наладки, эксплуатации и ремонта;

– функционирование в составе более крупного устройства;

– экспериментальное определение ресурса ГСП-панели.

Совокупность сложившихся тенденций и незатронутых, неосвещенных проблем является основой для формирования стратегий дальнейшего развития направления разработки ГСП-панелей и их глубокого теоретического и экспериментального исследования.

### Библиографический список

1. Пат. 2340478, Российская Федерация, МПК7 В 60 R 13/08, G 01 K 11/16. Панель звукоизолирующая / А.В. Зубарев, И.А. Трибельский, В.А. Адонин, В.И. Малютин; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-производственное предприятие «Прогресс». № 2007131186/11; заявл. 15.08.2007; опубл. 10.12.2008, Бюл. № 34.

2. Пат. 2457123, Российская Федерация, МПК7 В 60 R 13/08. Панель звукоизолирующая и способ ее изготовления / И.А. Трибельский, В.А. Адонин, С.П. Бобров, В.Д. Денисов, В.В. Бохан, В.А. Гидион; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-производственное предприятие «Прогресс». № 2011113321/11; заявл. 06.04.2011; опубл. 27.07.2012, Бюл. № 21.



3. Федорова М.А., Корнеев С.А. К динамике пластинчато-сетчатой панели // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность!: материалы IV Всерос. науч.-техн. конф. Омск. 2011. № 1. С. 133–136.
4. Корнеев С.А., Федорова М.А. Аналитический расчет собственных и вынужденных колебаний пластинчато-сетчатой панели // Омский научный вестник. 2011. № 3 (103) С. 129–133.
5. Трибельский И.А., Бохан В.В., Зубарев А.В., Попков С.В. Метод измерения звукоизоляции панелей с помощью акустического интерферометра // Омский научный вестник. 2012. № 3 (113). С. 88–94.
6. Федорова М.А., Корнеев С.А. Анализ динамики ПСП при ударных нагрузках // Динамика систем, механизмов и машин: материалы VIII Международной научно-технической конференции (г. Омск, 13–15 ноября 2012 г.). Омск. 2012. Ч. 1. С. 63–67.
7. Бохан В.В., Зубарев А.В. Экспериментальное исследование фрагментов гибких сетчато-пластинчатых панелей с помощью метода вынужденных резонансных колебаний: явление ползучести // Динамика систем, механизмов и машин: материалы IX Международной научно-технической конференции (г. Омск, 11–13 ноября 2014 г.). Омск. 2014. Ч. 1. С. 30–34.
8. Граков С.А., Таран В.А., Зелов А.Ф., Зубарев А.В. Расчет собственных частот и форм колебаний сетчато-пластинчатой панели методом конечных элементов // Динамика систем, механизмов и машин: материалы IX Междунар. науч.-техн. конф. (г. Омск, 11–13 ноября 2014 г.). Омск. 2014. Ч. 1. С. 50–52.
9. Федорова М.А., Соколовский З.Н., Корнеев С.А., Таран В.А. Исследование механических характеристик несущей металлической сетки из стали 12Х18Н9Т в составе пластинчато-сетчатой панели // Динамика систем, механизмов и машин: материалы IX Международной научно-технической конференции (г. Омск, 11–13 ноября 2014 г.). Омск. 2014. Ч. 1. С. 161–164.
10. Федорова М.А., Соколовский З.Н. Исследование параметров прочности и жесткости несущей металлической сетки из стали 12Х18Н9Т в составе пластинчато-сетчатой панели // Вестник СибАДИ. 2014. Вып. 4 (38). С. 88–93.
11. Бохан В.В., Граков С.А., Таран В.А., Зубарев А.В. Амплитудно-частотные характеристики фрагментов гибких сетчато-пластинчатых панелей: экспериментальное исследование восьми образцов // Омский научный вестник. 2015. № 2 (140). С. 185–189.
12. Пат. 2588410, Российская Федерация, МПК7 В 60 R 13/08. Панель звукоизолирующая и способ ее изготовления / В.А. Адонин, А.В. Зубарев, Д.А. Романюк, А.Ф. Зелов; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-производственное предприятие «Прогресс». № 2015116232/11; заявл. 28.04.2015; опубл. 27.06.2016. Бюл. № 18.
13. Граков С.А., Зубарев А.В., Бохан В.В. Исследование напряженно-деформированного состояния изогнутой звукоизолирующей гибкой сетчато-пластинчатой панели // Численные методы решения задач теории упругости и пластичности: материалы XXIV Всероссийской конференции (г. Омск, 2–4 июня 2015 г.). Омск. 2015. С. 47–50.
14. Таран В.А., Русских Г.С., Соколовский З.Н. Исследование механических характеристик тонкой проволоки из нержавеющей стали 12Х18Р9Т // Численные методы решения задач теории упругости и пластичности: материалы XXIV Всерос. конф. (г. Омск, 2–4 июня 2015 г.). Омск. 2015. С. 190–194.
15. Таран В.А., Русских Г.С., Соколовский З.Н., Кондюрин А.Ю. Моделирование механических характеристик тонкой проволоки после волочения // Омский научный вестник. 2015. № 3 (143). С. 353–357.
16. Граков С.А., Бохан В.В., Зубарев А.В. Применение полимерных материалов в конструкции звукопоглощающей гибкой сетчато-пластинчатой панели // Динамика систем, механизмов и машин: материалы X Междунар. науч.-техн. конф. (г. Омск, 15–16 ноября 2016 г.). Омск. 2016. Т. 1. С. 31–33.
17. Таран В.А., Русских Г.С., Соколовский З.Н. Моделирование статического прогиба и собственной частоты колебаний сетчато-пластинчатой звукоизолирующей панели // Омский научный вестник. 2016. № 4 (148). С. 51–55.
18. Таран В.А., Русских Г.С., Соколовский З.Н. Моделирование упругого растяжения тонкой плетеной металлической сетки (на примере сетки из нержавеющей стали 12Х18Н9Т) // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства: материалы 6-й Междунар. науч.-техн. конф. (г. Омск, 25–30 апреля 2016 г.). Омск, 2016. С. 85–86.
19. Бохан В.В., Граков С.А., Зубарев А.В. Комплексный подход к снижению шума и вибрации энергетического оборудования // Защита от повышенного шума и вибрации: материалы VI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (г. Санкт-Петербург, 21–23 марта 2017 г.). Санкт-Петербург. 2017. С. 271–275.
20. Романенко Э.А., Русских Г.С., Соколовский З.Н. Исследование влияния конструктивных параметров гибкой звукоизолирующей панели на ее звукоизоляционную характеристику // Россия молодая: передовые технологии в промышленность!: материалы VII Всероссийской научно-технической конференции (г. Омск, 11–13 апреля 2017 г.). Омск. 2017. № 1. С. 347–352.
21. Романенко Э.А., Соколовский З.Н. Влияние вынужденных поперечных колебаний гибкой панели при оценке звукоизоляции // Ученые Омска – региону: материалы II Региональной науч.-техн. конф. (г. Омск, 6–7 июня 2017 г.). Омск. 2017. С. 149–155.
22. Романенко Э.А., Русских Г.С., Соколовский З.Н. Исследование особенностей звукоизоляции гибкими панелями // Проблемы машиноведения: материалы II Междунар. науч.-техн. конф. (г. Омск, 27–28 февраля 2018 г.). Омск. 2018. С. 103–108.



## References

1. Zubarev A.V., Tribel'skij I.A., Adonin V.A., Malyutin V.I. *Panel' zvukoizoliruyushchaya* [Soundproofing panel]. Patent RF, no. 2340478, 2007.
2. Tribel'skij I.A., Adonin V.A., Bobrov S.P., Denisov V.D., Bohan V.V., Gidion V.A. *Panel' zvukoizoliruyushchaya i sposob ee izgotovleniya* [Soundproofing panel and its manufacturing method]. Patent RF, no. 2457123, 2012.
3. Fedorova M.A., Korneev S.A. *K dinamike plastinchato-setchatoj paneli* [To plate-mesh panel dynamics]. *Materialy IV Vseros. nauchno-tekhnicheskoy konferencii "Rossiya molodaya: peredovye tekhnologii – v promyshlennost'!"* [Proceedings of IV All-Russian scientific and technical conference "Young Russia: advanced technologies – to industry"]. Omsk, 2011. vol. 1. pp. 133–136.
4. Korneev S.A., Fedorova M.A. Analytical calculation of own and compelled fluctuations plate-mesh panel. *Omskij nauchnyj vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2011, no. 3 (103), pp. 129–133.
5. Tribel'skij I.A., Bohan V.V., Zubarev A.V., Popkov S.V. Method of panel sound insulation measurement by means of acoustic interferometer. *Omskij nauchnyj vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2012, no. 3 (113), pp. 88–94.
6. Fedorova M.A., Korneev S.A. *Analiz dinamiki PSP pri udarnykh nagruzkah* [Analysis of PSP dynamics under shock loads]. *Materialy VIII mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii "Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin"* [Proceedings of VIII international scientific and technical conference "Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines", Omsk, 13–15 November 2012]. Omsk, 2012, vol. 1, pp. 63–67.
7. Bohan V.V., Zubarev A.V. *Ekspperimental'noe issledovanie fragmentov gibkikh setchato-plastinchatyyh panelej s pomoshch'yu metoda vynuzhdennykh rezonansnykh kolebanij: yavlenie polzuchesti* [Experimental study of fragments of flexible mesh-plate panels by the method of forced resonance oscillations: creep phenomenon]. *Materialy IX mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii "Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin"* [Proceedings of IX international scientific and technical conference "Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines", Omsk, 11–13 November 2014]. Omsk, 2014, vol. 1, pp. 30–34.
8. Grakov S.A., Taran V.A., Zelov A.F., Zubarev A.V. *Raschet sobstvennykh chastot i form kolebanij setchato-plastinchatoj paneli metodom konechnyyh elementov* [Finite element method-based calculation of eigen frequencies and oscillation forms of a mesh-plate panel]. *Materialy IX Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii "Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin"* [Proceedings of IX international scientific and technical conference "Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines", Omsk, 11–13 November 2014]. Omsk, 2014, vol. 1, pp. 50–52.
9. Fedorova M.A., Sokolovskij Z.N., Korneev S.A., Taran V.A. *Issledovanie mekhanicheskikh harakteristik nesushchej metallicheskoj setki iz stali 12H18N9T v sostave plastinchato-setchatoj paneli* [Studying mechanical characteristics of the bearing wire mesh made of steel 12H18N9T as a component of the plate-mesh panel]. *Materialy IX mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii "Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin"* [Proceedings of IX international scientific and technical conference "Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines", Omsk, 11–13 November 2014]. Omsk, 2014, vol. 1, pp. 161–164.
10. Fedorova M.A., Sokolovskij Z.N. Research of parameters of strength and stiffness of the bearing metal grid from steel 12X18H9T comprising a plate-mesh panel. *Vestnik SibADI* [The Russian Automobile and Highway Industry Journal], 2014, vol. 4 (38), pp. 88–93.
11. Bohan V.V., Grakov S.A., Taran V.A., Zubarev A.V. Amplitude-frequency characteristics of the fragments of flexible mesh-plate panels: experimental study of eight samples. *Omskij nauchnyj vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2015, no. 2 (140), pp. 185–189.
12. Adonin V.A., Zubarev A.V., Romanyuk D.A., Zelov A.F. *Panel' zvukoizoliruyushchaya i sposob ee izgotovleniya* [Sound insulating panel and its manufacturing method]. Patent RF, no. 2588410, 2016.
13. Grakov S.A., Zubarev A.V., Bohan V.V. *Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya izognutoj zvukoizoliruyushchej gibkoj setchato-plastinchatoj paneli* [Study of the stress-strain state of a curved soundproofing flexible mesh-plate panel]. *Materialy XXIV vserossijskoj konferencii "Chislennyye metody resheniya zadach teorii uprugosti i plastichnosti"* [Proceedings of XXIV All-Russian conference "Computational methods for solving elasticity and plasticity theory problems", Omsk, 2–4 June 2015]. Omsk, 2015, pp. 47–50.
14. Taran V.A., Russkih G.S., Sokolovskij Z.N. *Issledovanie mekhanicheskikh harakteristik tonkoj provoloki iz nerzhavayushchej stali 12H18R9T* [Study of mechanical properties of thin stainless steel wire 12X18P9T]. *Materialy XXIV Vserossijskoj konferencii "Chislennyye metody resheniya zadach teorii uprugosti i plastichnosti"* [Proceedings of XXIV All-Russian conference "Computational methods for solving elasticity and plasticity theory problems", Omsk, 2–4 June 2015]. Omsk, 2015, pp. 190–194.
15. Taran V.A., Russkih G.S., Sokolovskij Z.N., Kondyurin A.Yu. Modeling of mechanical characteristics of thin wire after drawing (for example, stainless steel 321 (X10CRNiTi18-9)). *Omskij nauchnyj vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2015, no. 3 (143), pp. 353–357.
16. Grakov S.A., Bohan V.V., Zubarev A.V. *Primenenie polimernyyh materialov v konstrukcii zvukopogloshchayushchej gibkoj setchato-plastinchatoj paneli* [Application of polymeric materials in sound-absorbing flexible mesh-plate panel design]. *Materialy X Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii "Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin"* [Omsk, 15–16 November 2016]. Omsk, 2016, vol. 1, pp. 31–33.
17. Taran V.A., Russkih G.S., Sokolovskij Z.N. Simulation of static deflection and eigen oscillation frequency



of the mesh-plate soundproofing panel. *Omskij nauchnyj vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2016, no. 4 (148), pp. 51–55.

18. Taran V.A., Russkih G.S., Sokolovskij Z.N. *Modelirovanie uprugogo rastyazheniya tonkoj pletenoi metallicheskoi setki (na primere setki iz nerzhaveyushchej stali 12H18N9T)* [Modeling of elastic extension of thin woven metal mesh (on example of 12X18H9T stainless steel mesh)]. *Materialy 6-j Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoi konferencii "Tekhnika i tekhnologiya neftekhimicheskogo i neftegazovogo proizvodstva"* [Proceedings of VI international scientific and technical conference "Equipment and technology of petrochemical and oil and gas production", Omsk, 25–30 April 2016]. Omsk, 2016, pp. 85–86.

19. Bohan V.V., Grakov S.A., Zubarev A.V. *Kompleksnyy podhod k snizheniyu shuma i vibracii energeticheskogo oborudovaniya* [Integrated approach to noise and vibration reduction in power equipment]. *Materialy VI vserossijskoi nauchno-prakticheskoi konferencii s mezhdunarodnym uchastiem "Zashchita ot povyshennogo shuma i vibracii"* [Proceedings of VI All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation "Protection from increased noise and vibration", Saint-Petersburg, 21–23 March 2017]. Saint-Petersburg, 2017, pp. 271–275.

20. Romanenko E.A., Russkih G.S., Sokolovskij Z.N. *Issledovanie vliyaniya konstruk-tivnykh parametrov gibkoj*

*zvukoizoliruyushchej paneli na ee zvukoizolyacionnyu ha-rakteristiku* [Studying the effect of flexible soundproofing panel design parameters on its sound-insulating characteristics]. *Materialy VII vserossijskoi nauchno-tekhnicheskoi konferencii "Rossiya molodaya: peredovye tekhnologii v promyshlennost'!"* [Proceedings of VII All-Russian Scientific and Technical Conference "Young Russia: Advanced Technology – to Industry", Omsk, 11–13 April 2017]. Omsk, 2017, vol. 1, pp. 347–352.

21. Romanenko E.A., Sokolovskij Z.N. *Vliyaniye vynu-zhdennykh poperechnykh kolebaniy gibkoj paneli pri ocenke zvukoizolyacii* [Influence of forced transverse oscillations of a flexible panel in sound insulation estimation]. *Materialy II Regional'noj nauchno-tekhnicheskoi konferencii "Uchenye Omska – region"* [Proceedings of II Regional scientific and technical conference "Omsk scientists – for the region", Omsk, 6–7 June 2017]. Omsk, 2017, pp. 149–155.

22. Romanenko E.A., Russkih G.S., Sokolovskij Z.N. *Issledovanie osobennostej zvu-koizolyacii gibkimi panelyami* [Studying features of flexible panel sound insulation]. *Materialy II Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoi konferencii "Problemy mashinovedeniya"* [Proceedings of II International scientific and technical conference "Problems of Mechanical Engineering", Omsk, 27–28 February 2018]. Omsk, 2018, pp. 103–108.

#### Критерии авторства

Бохан В.В., Бобров С.П., Зубарев А.В. совместно провели исследование, также подготовили рукопись. Несут ответственность за плагиат.

#### Authorship criteria

Bokhan V.V., Bobrov S.P., Zubarev A.V. have conducted a joint research and prepared a manuscript. They are responsible for plagiarism.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.



Оригинальная статья / Original article  
УДК 658.511.3  
DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-10-20-28>

## СОКРАЩЕНИЕ ВРЕМЕНИ ПЕРЕНАЛАДКИ В ЦЕХАХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОСНАСТКИ ДЛЯ ЗАГОТОВИТЕЛЬНО-ШТАМПОВОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

© А.С. Исаченко<sup>1</sup>, Д.А. Журавлев<sup>2</sup>

Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

**РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ.** Современное машиностроительное производство имеет тенденцию снижения выпуска серийной продукции и большего использования универсального оборудования. Целью настоящего исследования является разработка алгоритма автоматизированного распределения микроэлементов переналадки между внешней и внутренней переналадкой для ускорения процесса внедрения метода быстрой переналадки (Single-Minute Exchange of Die – SMED). **МЕТОДЫ.** Для составления оптимального цехового расписания предлагается использование MES-систем и методики быстрой переналадки с использованием автоматизированного модуля. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Разработан алгоритм автоматического вынесения предложений по внедрению быстрой переналадки, основанный на списках объектов и приемов и позволяющий ускорить процесс внедрения метода SMED. **ВЫВОДЫ.** Повышение гибкости единичного производства с широкой номенклатурой продукции и, следовательно, конкурентоспособности предприятия возможно посредством применения таких методов оптимизации механизма запуска в производство, как оптимальное производственное планирование посредством использования MES-систем и автоматизированное внедрение методики быстрой переналадки.

**Ключевые слова:** быстрая переналадка, время переналадки, цеховое расписание, MES-система, метод SMED.

**Информация о статье.** Дата поступления 1 июня 2018 г.; дата принятия к печати 28 сентября 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 октября 2018 г.

**Формат цитирования.** Исаченко А.С., Журавлев Д.А. Сокращение времени переналадки в цехах изготовления оснастки для заготовительно-штамповочного производства // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 10. С. 20–28. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-20-28

## REDUCTION OF CHANGEOVER TIME OF BLANKING AND DIE FORGING TOOLING IN MANUFACTURING WORKSHOPS

A.S. Isachenko, D.A. Zhuravlev

Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

**ABSTRACT. PURPOSE.** Modern machine-building industry tends to decrease the output of batch production and increase the use of universal equipment. The purpose of this article is development of an automated sorting algorithm of microelement changeover between the inner and outer changeover in order to reduce the Single-Minute Exchange of Die (SMED) implementation time. **METHODS.** The authors suggest the use of MES systems and quick changeover methods with the use of the automated SMED implementation technique for optimal workshop scheduling. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** An algorithm of automated change proposal on quick changeover introduction has been developed. It is based on the lists of objects and techniques and allows to speed up the process of SMED method implementation. **CONCLUSIONS.** The flexibility of piece-work production with a wide range of product and enterprise competitiveness can be improved through the use of the following optimization methods of product start-up: optimal master production scheduling by the use of MES systems and automated implementation of the quick changeover procedure.

<sup>1</sup>Исаченко Алексей Сергеевич, аспирант, e-mail: [isachenko.alexey.irk@gmail.com](mailto:isachenko.alexey.irk@gmail.com)  
Aleksy S. Isachenko, Postgraduate student, e-mail: [isa-chenko.alexey.irk@gmail.com](mailto:isa-chenko.alexey.irk@gmail.com)

<sup>2</sup>Журавлев Диомид Алексеевич, доктор технических наук, профессор кафедры технологии и оборудования машиностроительного производства, e-mail: [dio@istu.edu](mailto:dio@istu.edu),  
Diomid A. Zhuravlev, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Technology and Equipment of Machine-Building Production, e-mail: [dio@istu.edu](mailto:dio@istu.edu)



**Keywords:** *quick changeover, changeover time, workshop scheduling, MES system, SMED (Single-Minute Exchange of Die) method*

**Information about the article.** Received June 1, 2018; accepted for publication September 28, 2018; available online October 31, 2018.

**For citation.** Isachenko A.S., Zhuravlev D.A. Reduction of changeover time of blanking and die forging tooling in manufacturing workshops. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University, 2018, vol. 22, no. 10, pp. 20–28. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-20-28. (In Russian).

## Введение

В современных условиях повышение конкурентоспособности предприятия является залогом его успешности. Однако в настоящее время значительная часть ресурса повышения производительности заключается не только в самих орудиях производства, но и в области управления производственными процессами. Современные тенденции развития машиностроительного производства нередко требуют снижения объема партии производства и способности предприятия в краткие сроки адаптироваться к новым требованиям рынка. Гибкость управленческой структуры и возможность оперативно перестраивать производственные процессы являются преимуществами малых и средних предприятий машиностроения [1].

Частным случаем производства, эффективность которого может быть улучшена путем оптимизации производственного процесса без значительных материальных затрат, является производство оснастки для заготовительно-штамповочного производства. Цеха по производству оснастки характеризуются изготовлением деталей различных конструкций с однократным выпуском и частой сменой объекта производства на неспециализированных рабочих местах. В таких условиях время механообработки на станке составляет лишь малую долю всего рабочего времени, большая часть которого тратится на переналадку станка и другие

подготовительно-заготовительные операции. Более того, особенностью производства в таких цехах является необходимость выполнения заказов в виде целого комплекта деталей и сборочных единиц к фиксированному сроку. Изделия часто выпускаются парно – в прямом и отраженном исполнениях.

Единичный выпуск изделий широкой номенклатуры не позволяет накапливать данные о технологических процессах и затрудняет оптимизацию процессов производства, так как ведущую роль в принятии решения играет человек – технолог, мастер цеха или оператор станка. Традиционные системы планирования, которые на многих предприятиях работают в течение десятилетий, устарели и нуждаются в изменении и модернизации.

Поэтому в заготовительно-штамповочном производстве для повышения эффективности работы цехов по изготовлению оснастки с учетом частой смены производственной ситуации важной и актуальной является разработка методов снижения времени перехода на новое изделие.

Одним из вариантов решения задачи цехового планирования является применение MES-систем (Manufacturing Execution System – системы оперативного управления производством), учитывающих особенности данного производства.

## Быстрая переналадка

В цехах изготовления оснастки существует возможность многовариантности технологического процесса, подразумевающая различные комбинации оборудования и,

следовательно, различные величины подготовительно-заключительного времени. В связи с этим возникает проблема оптимизации технологических процессов для предот-



вращения чрезмерной нагрузки определенных единиц оборудования и повышения пропускной способности производственного участка в целом.

Перегрузка определенных единиц оборудования приводит к накоплению запасов незавершенного производства и общему снижению производительности [2]. Влияние длительности переналадки на производственную мощность можно ослабить путем оптимального оперативно-календарного планирования.

Плановая группа или применяемая на предприятии MES-система может составлять цеховые расписания по разным критериям, таким как наименьшее количество переналадок, первоочередность обработки детали с наименьшим изменением в наладке [3], или вышеупомянутый критерий, модифицированный модулем приоритетов [4]. Многие MES-системы, в том числе MES «Фобос», являющаяся отечественной разработкой, имеют возможность модификации системы дополнительными программными модулями, что позволяет выбрать критерий составления расписания, наиболее подходящий для рассматриваемого вида производства [5].

После составления желаемой последовательности запуска единиц планирования в производство на реальном производстве все равно могут существовать ситуации, когда при обработке двух последовательных единиц планирования используются не имеющие сходства наборы инструмента и другого оснащения. В таких случаях время перехода на новое изделие можно уменьшить, уменьшив время самого процесса переналадки. В цехах по изготовлению оснастки для заготовительно-штампочного производства объем партии обычно равен 1 или 2, поэтому снижение доли времени переналадки при помощи повышения объема партии невозможно. Эти же принципы применимы к производству на машиностроительных предприятиях малого бизнеса, которое характеризуется выпуском изделий малыми партиями.

Одним из методов, позволяющих сократить время переналадки оборудования

до нескольких минут, является быстрая переналадка (Single-Minute Exchange of Die – SMED). SMED-система представляет собой набор теоретических и практических методов минимизации времени перехода на изготовление нового изделия.

Снижение времени переналадки оказывает следующий эффект на производство:

- повышается гибкость предприятия при работе по «вытягивающей» логистической системе [6];

- повышается пропускная способность станков с высокой долей загрузки, увеличивается их производительность [6];

- возникает стимул для разработки новых приспособлений [7];

- косвенно повышается экологичность производства [8].

Можно спроектировать новый станок, что является наиболее эффективным, но и наиболее дорогостоящим методом. Применение одних лишь организационных улучшений при помощи методики SMED наиболее дешево, но приносит наименьший результат. Рациональным с точки зрения стоимости и эффекта является применение организационных улучшений в совокупности с конструктивными модификациями оборудования. В работе [9] отмечается, что добиться устойчивости результата при модификации оборудования сложнее, чем при разработке нового станка.

Процедура внедрения методики SMED описана, например, в работах [10–12]. Она может быть модифицирована путем включения дополнительного этапа, во время которого определяется применимость полученных действий на другом оборудовании, на котором методика еще не была внедрена. Это усовершенствование позволяет снизить время последующих внедрений методики SMED.

Следует отметить диаграмму «спагетти» [13], которая традиционно показывает перемещения оператора станка в процессе переналадки, может быть также составлена для промышленных роботов, что позволит оптимизировать их движения и избавиться от лишних действий.



Методика бережливого производства может быть выполнена с применением информационных систем, таких как системы MES, которые могут помочь поддержать полученные результаты при помощи обязательной стандартизации выполняемых процессов [14]. Интеграция SMED-методики с системами MES позволяет решить проблему планирования переналадки на нескольких станках [15]. Внедрение системы MES также позволяет эффективно перераспределять индивидуальные операции переналадки между доступными рабочими местами и операторами.

Несмотря на многочисленные примеры успешного внедрения метода SMED, некоторым предприятиям не удается этого сделать. Авторы работы [16] одной из возможных причин неудачного внедрения SMED считают чрезмерную строгость следования процедуре внедрения. Действительно, в некоторых ситуациях внедрение за четыре этапа может быть не самым эффективным. Кроме того, некоторые предприятия делают акцент на преобразовании внутренней переналадки на внешнюю, упуская из виду важность минимизации или упрощения внутренних и внешних действий при помощи конструктивных улучшений. Эта проблема возникает из-за сфокусированности методики С. Синго на организационных приемах, а не на улучшении оборудования или приспособлений [17].

В реальных производственных условиях может сложиться ситуация, когда сложно выделить специальную рабочую группу для проведения мероприятий по внедрению SMED. Данная процедура может быть автоматизирована, что снизит время ее проведения.

Предположим, что существует множество  $N_s = \{a_1, a_2, \dots, a_{max}\}$ , элементы которого являются микроэлементами, из которых состоит процесс переналадки оборудования.

Каждый элемент множества  $N_s$  в свою очередь является функцией  $a_i = f(a_{i.act}, a_{i.object}, a_{i.item}, a_{i.time})$ , которая имеет следующие параметры: прием –  $a_{i.act}$ , объект –

$a_{i.object}$ ; предмет –  $a_{i.item}$ , и время его исполнения –  $a_{i.time}$ .

Действия преобразуются в элементы множества  $N_s$  с принятием каждым параметром численного или словесного значения. Например, такое действие, как перемещение заготовки на телеге за 15 секунд можно представить в виде  $a_1 = \{\text{«Переместить»}, \text{«Заготовка»}, \text{«Тележка»}, 15\}$ . У элементов некоторые из параметров могут принимать нулевое значение. Например, перемещение оператора станка к компьютеру за 13 секунд может быть представлено как  $a_2 = \{\text{«Идти»}, \text{«Компьютер»}, \text{«»}, 13\}$ , у этого действия предмет имеет нулевое значение.

Все ключевые слова, описывающие приемы, объекты и предметы, должны быть стандартизованы во избежание неправильной трактовки. Так, должно быть только ключевое слово приема «Переместить», но не «Переместил», «Передвинул», «Перекатил» и т.п.

Эти элементы не имеют никакой структуры, но связаны логикой процесса переналадки. Так, нельзя установить в шпиндель станка инструмент, не демонтировав перед этим уже установленный в нем инструмент. Логика процесса переналадки может отличаться для разных станков, но в любом случае ряд действий вида  $\overline{a_i, \dots, a_{i-k}}$ , где  $k$  – шаг действия, не должен быть выполнен.

Для реализации данного подхода необходимо выделить действия внешней переналадки из общего множества микроэлементов переналадки  $N_s$ .

Таким образом, множество  $N_s$  следует разбить на два подмножества – подмножество микроэлементов внешней переналадки  $E$ , которые возможно выполнять при работающем оборудовании, и подмножество микроэлементов внутренней переналадки  $I$ , которые возможно выполнять только при остановленном оборудовании.

При внедрении быстрой переналадки все операции по разделению выполняются на основе субъективных мнений инженера без привлечения автоматизированных средств. Результат в большей степени



зависит от таких факторов, как субъективизм и вариативность решений. Если для станка составить списки ключевых слов, описывающих приемы, объекты и предметы процесса переналадки для обоих конечных подмножеств – внешней и внутренней переналадки, то последующее сопоставление по алгоритму каждого микроэлемента множества  $N_s$  с данными списками на предмет совпадения параметров может выявить возможность вынесения микроэлемента в подмножество внешней переналадки  $E$ . Критерий вынесения может быть установлен в виде процентного соотношения совпадений со списком ключевых слов внешней переналадки  $C_{ext}$  и списком ключевых слов внутренней переналадки  $C_{int}$ . Например,  $C_{ext}/C_{int} > 50\%$ . Очевидно, что любой микроэлемент может иметь совпадения с обоими списками и, таким образом, частично относиться к обоим подмножествам. Установленный критерий перенесения и экспертная оценка помогут окончательно определить микроэлемент к одному из подмножеств:

$$C_{ext} > C_{int} \rightarrow a_i \in E;$$

$$C_{ext} \leq C_{int} \rightarrow a_i \in I.$$

Экспертная оценка также нужна еще и для определения реальности перенесения. Если в действительности микроэлемент не может быть выполнен при работающем оборудовании, то он должен остаться в подмножестве внутренней переналадки, несмотря на предлагаемое перенесение.

Логика действий в заполненных множествах  $E=\{a_i, \dots\}$  и  $I=\{a_j, \dots\}$  не должна быть нарушена, что проверяется экспертом. То есть проверяется факт того, может ли любой  $a_i$  быть в  $E$ , когда  $a_j$  находится в  $I$ , и может ли  $a_i$  быть после  $a_{j-k}$  в то время как  $a_j$  находится после  $a_{j-k}$ .

Для математического описания алгоритма распределения микроэлементов между подмножествами внутренней и внешней переналадки и представления его в виде блок-схемы определим:

1)  $N_s = \{a_1, a_2, \dots, a_{max}\}$ , где  $a_i = f\{a_i.act, a_i.object, a_i.item, a_i.time\}$ . Данное множество содержит все микроэлементы переналадки до перераспределения;

2)  $E = \emptyset$  и  $I = \emptyset$ . Данные изначально пустые множества будут содержать микроэлементы внешней и внутренней переналадки, соответственно, после распределения;

3)  $E_{act} = \{e_{act1}, e_{act2}, \dots, e_{actmax}\}$  и  $I_{act} = \{i_{act1}, i_{act2}, \dots, i_{actmax}\}$ , содержащие списки ключевых слов действий, которые могут выполняться при работающем и неработающем оборудовании соответственно;

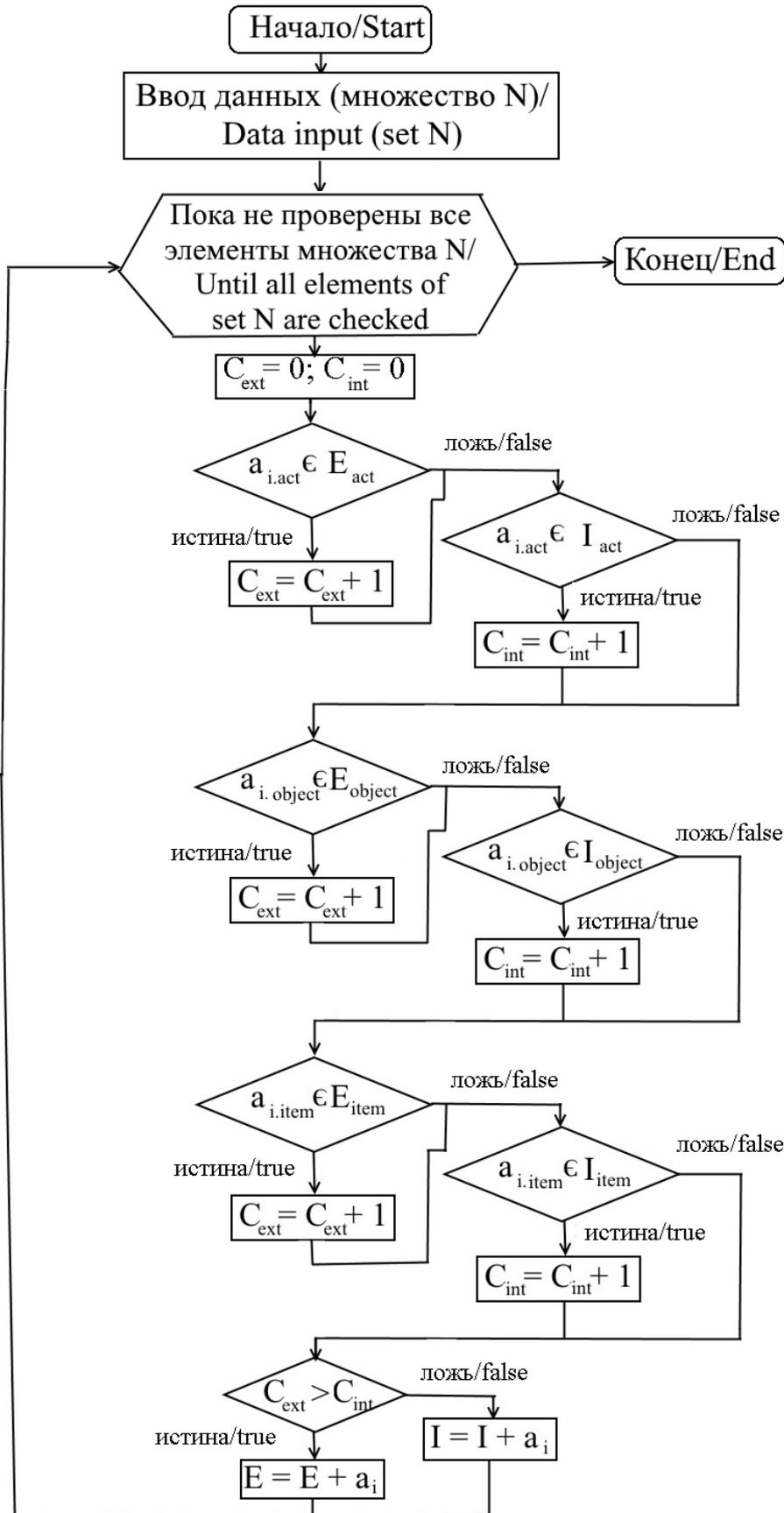
4)  $E_{obj} = \{e_{obj1}, e_{obj2}, \dots, e_{objmax}\}$  и  $I_{obj} = \{i_{obj1}, i_{obj2}, \dots, i_{objmax}\}$ , содержащие списки ключевых слов объектов, действия над которыми могут производиться при работающем и неработающем оборудовании соответственно;

5)  $E_{item} = \{e_{item1}, e_{item2}, \dots, e_{itemmax}\}$  и  $I_{item} = \{i_{item1}, i_{item2}, \dots, i_{itemmax}\}$ , содержащие списки ключевых слов предметов, при помощи которых могут производиться действия при работающем и неработающем оборудовании соответственно.

Следует отметить что множества, описанные в пунктах 3–5, могут пересекаться и отличаться в зависимости от конструкции и технологических возможностей рассматриваемой единицы оборудования;

6)  $C_{ext}$  и  $C_{int}$  – переменные, содержащие в себе количество совпадений параметров микроэлемента  $a_i$  со списками, описанными в пунктах 3–5.

Микроэлементы распределяются по алгоритму (рисунок). Каждый элемент множества  $N_s$  проверяется на принадлежность (полную или частичную) к множествам  $E$  и  $I$ . Для этого параметры «действие», «объект» и «предмет» проверяются на вхождение в списки, содержащие ключевые слова соответствующих категорий, подходящих для выполнения переналадки вне станка и при работающем оборудовании (см. пункты 3–5 выше). Количество совпадений определяет степень принадлежности элемента к соответствующему подмножеству. Если принадлежность к подмножеству внешней переналадки выше, чем принадлежность к подмножеству внутренней переналадки, то рассматриваемый элемент помещается в подмножество  $E$ . В противном случае он помещается в подмножество  $I$ .



Алгоритм распределения микроэлементов процесса переналадки  
Sorting algorithm of microelement changeover



Логически действия над каждым микроэлементом множества  $N_s$  можно описать следующим образом:

$$C_{ext} = 0;$$

$$C_{int} = 0;$$

$$a_{i.act} \in E_{act} \rightarrow C_{ext} = C_{ext} + 1;$$

$$a_{i.act} \in I_{act} \rightarrow C_{int} = C_{int} + 1;$$

$$a_{i.object} \in E_{object} \rightarrow C_{ext} = C_{ext} + 1;$$

$$a_{i.object} \in I_{object} \rightarrow C_{int} = C_{int} + 1;$$

$$a_{i.item} \in E_{item} \rightarrow C_{ext} = C_{ext} + 1;$$

$$a_{i.item} \in I_{item} \rightarrow C_{int} = C_{int} + 1;$$

$$C_{ext} > C_{int} \rightarrow E = E + a_i$$

$$C_{ext} \leq C_{int} \rightarrow I = I + a_i$$

Процесс автоматического составления аналитической карты был реализован в виде макроса, написанного на языке Visual Basic в среде Microsoft Excel.

Применение MES-системы для распределения действий между параллельно работающими операторами возможно только после проведения стандартизации действий.

Недостатком данного подхода к внедрению быстрой переналадки является необходимость в ручной проверке и, возможно, коррекции результата вследствие нарушения логики процесса переналадки. Влияние данного аспекта можно ослабить путем группировки микроэлементов на укрупненные микроэлементы, производимые в определенной последовательности. В таком случае микроэлемент может быть перенесен в подмножество внешней переналадки, только если все микроэлементы предыдущих или последующих укрупненных элементов были переведены.

## Заключение

В производстве с единичным выпуском изделий, например таком, какое наблюдается в цехах по изготовлению оснастки для заготовительно-штамповочного производства, существует проблема частых переналадок оборудования. Конкурентоспособность предприятий с данным видом производства напрямую зависит от их гибкости. Скорость перестройки производства под заказ клиента может быть увеличена за счет сокращения времени переналадки станков. Время переналадки, в свою очередь, может быть сокращено путем внедрения методики быстрой переналадки.

Авторами настоящей статьи предложен алгоритм автоматического составления аналитической карты для процесса переналадки на основе математической логики и нечетких множеств, работающих на списках приемов и вспомогательных переходов. Его

использование позволит проводить внедрение методики быстрой переналадки за более короткий срок и с меньшим вложением ресурсов, чем при задействовании рабочей группы. Однако алгоритм проведения мероприятий по внедрению методик SMED следует модифицировать дополнительным шагом, позволяющим использовать полученные при внедрении данные для подобного оборудования, что сократит время проведения последующих подобных мероприятий.

Механизм запуска деталей в производство может быть усовершенствован при помощи оптимального цехового планирования, которое в настоящее время нередко выполняется MES-системой, применяемой на производстве. Критерий оптимальности должен быть выбран с учетом особенностей вида производства.

## Библиографический список

1. Васильева З.А., Назаревич А.В. Малые и средние предприятия в машиностроении [Электронный ресурс] // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. 2013. № 9 (57). URL: <http://uecs.ru/marketing/item/2337-2013-09-09-08-54-21> (16.04.2018).

2. Синго С. Изучение производственной системы Тойоты с точки зрения организации производства / пер. с англ. М.: Изд-во Института комплексных стратегических исследований, 2006. 298 с.

3. Казимиров Д.Ю., Исаченко А.С. Формирование последовательности запуска в производство изделий



одновременной кластеризацией по технологическим признакам и классам деталей // Вестник ИрГТУ. 2016. № 7. С. 24–36. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-24-36>

4. Исаченко А.С. Применение приоритетной двухходовой кластеризации для составления расписания запуска деталей в производство // Авиационное машиностроение и транспорт Сибири: сборник трудов Всероссийской молодежной научно-практической конференции (Иркутск, 11 ноября 2016 г.). Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2016. С. 218–222.

5. Полянсков Ю.В., Китаев В.Л., Гисметулин А.Р., Зайкин М.А., Лотоцкий А.М. Система оперативного планирования (MES-система) механообрабатывающего производства авиастроительного предприятия // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 4 (4). С. 870–875.

6. Kušar J., Berlec T., Zefan F., Starbek M. Reduction of Machine Setup Time // *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering*. 2010. Vol. 56. No. 12. P. 833–845.

7. Cakmakci M. Process improvement: performance analysis of the setup reduction-SMED in the automobile industry // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2009. Vol. 41. No. 1-2. P. 168–179.

8. Costa E., Sousa R., Bragança S., Alves A. An industrial application of the SMED methodology and other lean production tools // 4th International Conference on Integrity, Reliability and Failure, June 23–27. Funchal.

9. Culley S.J., Owen G.W., Mileham A.R., McIntosh R.I. Sustaining Changeover Improvement // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2003. Vol. 217. No. 10. P. 1455–1470.

10. Patel Chintan Kumar. Set up Reduction – A perfect way for productivity improvement of computer numerical control (CNC) set up in manufacturing company // Jour-

nal of Mechanical Engineering Research. 2013. Vol. 5. No. 8. P. 166–170.

11. Haiqing Guo. Head & Base Production Optimization: Setup Time Reduction. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2009. 60 p.

12. Mohd Norzaimi Bin Che Ani, Mohd Sollahuddin Solihin Bin Shafei. The Effectiveness of the Single Minute Exchange of Die (SMED) Technique for the Productivity Improvement // *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research (IJSBAR)*. 2012. Vol. 5. No. 1. P. 9–13.

13. Spaghetti Diagram // *Six Sigma Material*. 2014. URL: <http://www.six-sigma-material.com/Spaghetti-Diagram.html> (21.11.2014).

14. Cottyn J., Van Landeghem H., Stockman K., Deramelaere S. A method to align a manufacturing execution system with Lean objectives // *International Journal of Production Research*. 2011. Vol. 49. No. 14. P. 4397–4413. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207543.2010.548409>

15. Palanisamy S., Siddiqui S. Changeover Time Reduction and Productivity Improvement by Integrating Conventional SMED Method with Implementation of MES for Better Production Planning and Control // *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2013. Vol. 2. No. 12. P. 7961–7974.

16. McIntosh R.I., Culley S.J., Mileham A.R., Owen G.W. A critical evaluation of Shingo's 'SMED' (Single Minute Exchange of Die) methodology // *International Journal of Production Research*. 2000. Vol. 38. P. 2377–2395.

17. Reik M.P., McIntosh R.I., Culley S.J., Mileham A.R., Owen G.W. A formal design for changeover (DFC) methodology. Part 1: Theory and background // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 220. 2006. No. 8. P. 1225–1236.

## References

1. Vasil'eva Z.A., Nazarevich A.V. *Malye i srednie predpriyatiya v mashinostroyenii* [Small and medium-sized machine industry enterprises]. *Upravlenie ekonomicheskimi sistemami: elektronnyj nauchnyj zhurnal* [Management of Economic Systems]. 2013, no. 9 (57). Available at: <http://uecs.ru/marketing/item/2337-2013-09-09-08-54-21> (accessed 16 April 2018).

2. Singo S. *Izuchenie proizvodstvennoi sistemy Toioty s tochki zreniya organizatsii proizvodstva* [Study of Toyota production system in terms of production organization]. Moscow: Institute of complex strategic researches Publ., 2006, 298 p.

3. Kazimirov D.Yu., Isachenko A.S. Production sequence formation using simultaneous clustering by part technological features and classes. // *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2016, no. 7, pp. 24–36. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-24-36> (In Russian).

4. Isachenko A.S. *Primenenie prioritetnoj dvuhhodovoy klasterizatsii dlya sostavleniya raspisaniya zapuska de-*

*talej v proizvodstvo* [Application of priority two-way clustering for scheduling launch of parts into production]. *Sbornik trudov Vserossijskoj molodezhnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Aviamashinostroyenie i transport Sibiri"* [Collection of articles of All-Russian youth scientific and practical conference "Aircraft Engineering and Transport in Siberia"]. Irkutsk: IRNITU Publ., 2016, pp. 218–222. (In Russian).

5. Polyanskov Yu.V., Kitaev V.L., Gismetulin A.R., Zajkin M.A., Lotockij A.M. Operational planning system (MES system) machining production aircraft building enterprises. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk* [Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2013, vol. 15, no. 4 (4), pp. 870–875. (In Russian).

6. Kušar J., Berlec T., Zefan F., Starbek M. Reduction of Machine Setup Time. *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering*. 2010, vol. 56, no. 12, pp. 833–845.

7. Cakmakci M. Process improvement: performance analysis of the setup reduction-SMED in the automobile



industry. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2009, vol. 41, no. 1-2, pp. 168–179.

8. Costa E., Sousa R., Bragança S., Alves A. An industrial application of the SMED methodology and other lean production tools // 4th International Conference on Integrity, Reliability and Failure, June 23–27. Funchal.

9. Culley S.J., Owen G.W., Mileham A.R., McIntosh R.I. Sustaining Changeover Improvement. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2003, vol. 217, no. 10, pp. 1455–1470.

10. Patel Chintan Kumar. Set up Reduction – A perfect way for productivity improvement of computer numerical control (CNC) set up in manufacturing company. *Journal of Mechanical Engineering Research*. 2013, vol. 5, no. 8, pp. 166–170.

11. Haiqing Guo. Head & Base Production Optimization: Setup Time Reduction. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2009, 60 p.

12. Mohd Norzaimi Bin Che Ani, Mohd Sollahuddin Solihin Bin Shafei. The Effectiveness of the Single Minute Exchange of Die (SMED) Technique for the Productivity Improvement. *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research (IJSBAR)*. 2012, vol. 5, no. 1, pp. 9–13.

#### Критерии авторства

Исаченко А.С. разработал алгоритм сортировки, составил технологические выводы и рекомендации. Журавлев Д.А. занимался методологией научного исследования. Исаченко А.С. несет ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

13. Spaghetti Diagram // Six Sigma Material. 2014. Available at: <http://www.six-sigma-material.com/Spaghetti-Diagram.html> (accessed 21 November 2014).

14. Cottyn J., Van Landeghem H., Stockman K., Deramelaere S. A method to align a manufacturing execution system with Lean objectives // *International Journal of Production Research*. 2011, vol. 49, no. 14, pp. 4397–4413. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207543.2010.548409>

15. Palanisamy S., Siddiqui S. Changeover Time Reduction and Productivity Improvement by Integrating Conventional SMED Method with Implementation of MES for Better Production Planning and Control. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2013, vol. 2, no. 12, pp. 7961–7974.

16. McIntosh R.I., Culley S.J., Mileham A.R., Owen G.W. A critical evaluation of Shingo's 'SMED' (Single Minute Exchange of Die) methodology. *International Journal of Production Research*. 2000, vol. 38, pp. 2377–2395.

17. Reik M.P., McIntosh R.I., Culley S.J., Mileham A.R., Owen G.W. A formal design for changeover (DFC) methodology. Part 1: Theory and background. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B: Journal of Engineering Manufacture, 220. 2006, no. 8, pp. 1225–1236.

#### Authorship criteria

Isachenko A.S. developed a sorting algorithm, derived technological conclusions and gave recommendations. Zhuravlev D.A. dealt with scientific research methodology. Isachenko A.S. bears the responsibility for plagiarism.

#### Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.



Оригинальная статья / Original article  
УДК 621.98.042  
DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-10-29-37>

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВНУТРЕННИХ СИЛОВЫХ ФАКТОРОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ УПРОЧНЕНИИ ПОДКРЕПЛЕННЫХ РЕБРАМИ ДЕТАЛЕЙ

© А.А. Макарук<sup>1</sup>, А.А. Пашков<sup>2</sup>, А.М. Хамаганов<sup>3</sup>, О.В. Самойленко<sup>4</sup>

Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

**РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ.** Детали силового каркаса летательных аппаратов, изготавливаемые из алюминиевых сплавов, в целях повышения жесткости, как правило, имеют продольно-поперечное оребрение. В результате поперечное сечение таких деталей представляет сложную комплексную форму в виде тавра, швеллера, двутавра и т.д. с прямыми и наклонными полками. При изготовлении деталей в процессе как фрезерования, так и последующего упрочнения ударными методами возникает нежелательная деформация (поводки), выражающаяся в отклонении от плоскостности и саблевидности. После фрезерования поводки могут быть устранены методами местного пластического деформирования, такими как раскатка роликами, или прессовой обработкой, а после упрочнения механическая обработка, в том числе правка методами МПД, не регламентирована отраслевой нормативной технической документацией в связи с возможным внесением неопределенного напряженно-деформированного состояния в упрочненный поверхностный слой и появлением разупрочненных зон в поверхностном слое обрабатываемой детали. Расширение технологических возможностей изготовления мало жестких деталей с применением технологии превентивного деформирования – внесения предыскажения формы детали для компенсации поводок, возникающих на последующих упрочняющих операциях методами поверхностного пластического деформирования. **МЕТОДЫ.** Моделирование с использованием нелинейного конечно-элементного анализа для определения общей изгибной деформации детали, возникающей при поверхностном упрочнении дробью малых фракций, исследование кривизны образцов при помощи индикаторных устройств для определения силовых факторов процесса упрочнения на основе известных закономерностей теории упругости. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Получены результаты экспериментального исследования по обработке имитаторов конструктивных элементов подкрепленной ребрами детали. Обоснована необходимость использования моделирования для определения деформаций деталей, подвергаемых упрочнению ударными методами.

**Ключевые слова:** мало жесткие детали, превентивное деформирование, раскатка роликами, упрочнение ударными методами, моделирование.

**Информация о статье.** Дата поступления 29 августа 2018 г.; дата принятия к печати 28 сентября 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 октября 2018 г.

**Формат цитирования.** Макарук А.А., Пашков А.А., Хамаганов А.М., Самойленко О.В. Определение внутренних силовых факторов, возникающих при упрочнении подкрепленных ребрами деталей // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 10. С. 29–37. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-29-37

<sup>1</sup>Макарук Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, e-mail: makaruk\_aa@mail.ru  
Alexander A. Makaruk, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Technology and Equipment of Machine-Building Productions, e-mail: makaruk\_aa@mail.ru

<sup>2</sup>Пашков Александр Андреевич, младший научный сотрудник, аспирант кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, e-mail: pashk0ff@mail.ru  
Alexander A. Pashkov, Junior Researcher, Postgraduate of the Department of Technology and Equipment of Machine-Building Productions, e-mail: pashk0ff@mail.ru

<sup>3</sup>Хамаганов Анатолий Маратович, научный сотрудник, e-mail: am\_chamaganov@mail.ru.  
Anatoly M. Khamaganov, Researcher, e-mail: am\_chamaganov@mail.ru.

<sup>4</sup>Самойленко Олег Викторович, младший научный сотрудник, студент, e-mail: olegsamoylenko1@gmail.com  
Oleg V. Samoilenko, Junior Researcher, Student, e-mail: olegsamoylenko1@gmail.com



## DETERMINATION OF INTERNAL FORCE FACTORS UNDER RIBBED PART HARDENING

A.A. Makaruk, A.A. Pashkov, A.M. Khamaganov, O.V. Samoilenko

Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

**ABSTRACT. PURPOSE.** As a rule the parts of aircraft primary structures made of aluminum alloys have longitudinal-transverse ribs in order to increase rigidity. As a result, the cross-section of such parts has a complex shape in the form of a T, a channel, double T, etc. with straight and tilted shelves. The manufacture of these parts involving the processes of milling and subsequent hardening by impact methods is accompanied by the unwanted deformation (buckling) which is represented by the deviation from flatness and blade shape. The buckling can be eliminated after milling by the methods of local plastic deformation including roller burnishing, or pressing. Mechanical processing after hardening including the straightening by the magnetic particle method is not regimented by the industry normative technical documentation due to the possibility of introduction of an undetermined stress-strain state in the hardened surface layer and occurrence of weakened zones in the surface layer of the part. Enhancement of technological capabilities for low rigid part production with the use of the preventive deformation technology implies the introduction of part shape distortion in order to compensate the buckling that arises in subsequent hardening operations performed by the methods of surface plastic deformation. **METHODS.** The study employs the modeling using nonlinear finite element analysis to determine the general bending strain of a part resulting from surface hardening of small fractions by shot peening, study of the sample curvature with the help of indicating devices to determine the force factors of the hardening process on the basis of the known laws of the theory of elasticity. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The results of an experimental study on machining of simulators of structural elements reinforced by ribbed parts are obtained. The need for using modeling to determine the deformations of parts subjected to hardening by impact methods is substantiated.

**Keywords:** *low-rigid parts, preventive deformation, roller burnishing, hardening by impact methods, modeling*

**Information about the article.** Received August 29, 2018; accepted for publication September 28, 2018; available online October 31, 2018.

**For citation.** Makaruk A.A., Pashkov, A.A. Khamaganov A.M., Samoilenko O.V. Determination of internal force factors under ribbed part hardening. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 10, pp. 29–37. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-29-37. (In Russian)

### Введение

В основу конструкции силового каркаса самолета МС-21 входят детали типа «обод шпангоута», показанные на рис. 1. Такие детали изготавливают фрезерованием из термически упрочненных алюминиевых сплавов. После механообработки в результате перераспределения остаточных напряжений на них возникают отклонения формы величиной до нескольких миллиметров, существенно превышающие допустимые значения:  $\pm 0,15$  мм – от теоретического контура; 0,4 мм – от плоскостности. Для достижения допустимых отклонений теоретического контура детали используется правка деталей методами местного пластического деформирования (МПД), такими как раскатка роликами. В работах [1–3] описана технология правки маложестких деталей раскаткой с использованием отечественного раскатного оборудования. Среди зару-

бежных авторов также известен ряд работ [4, 5], посвященных формообразованию и правке маложестких деталей раскаткой роликами.

Для повышения эксплуатационного ресурса деталей на последующих операциях производится их упрочнение ударными методами [6, 7], что также способствует возникновению недопустимых отклонений под действием внутренних остаточных напряжений. Применение после упрочнения традиционных методов правки: прессовой обработки, раскатки роликами и т.п. ограничено существующей отраслевой нормативно-технологической документацией, а правка дробью хоть и допускается после дробеметного упрочнения, вместе с тем является очень трудоемким процессом и не всегда позволяет добиться требуемого результата в полной мере.

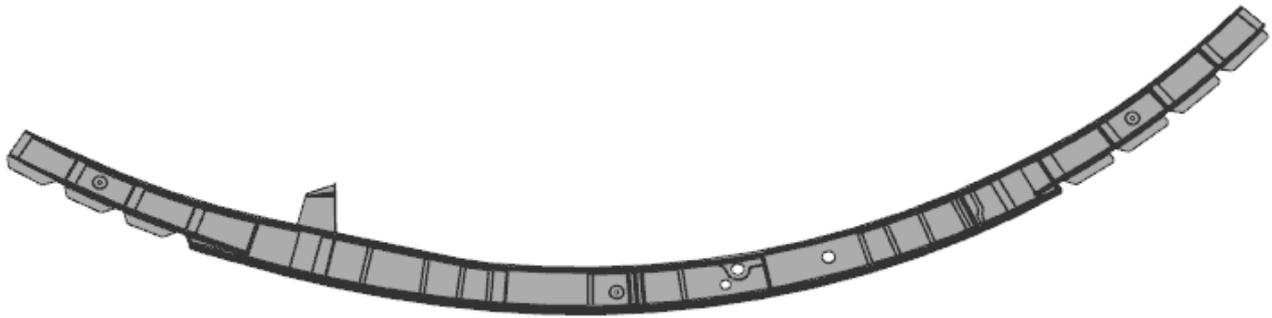


Рис. 1. Обод шпангоута  
Fig. 1. Bulkhead rim

Ввиду этого актуальной задачей представляется разработка методики определения возможных поводок контура детали

после дробеметного упрочнения на основании конечно-элементного анализа.

### Методика расчета внутренних силовых факторов дробеметного упрочнения

Минимизация возникающих после упрочнения отклонений возможна при использовании превентивного деформирования на операциях правки после механообработки. При этом величина деформирования может быть определена по результатам упрочнения конструктивно-подобных образцов деталей или моделирования в системах инженерного анализа.

На сегодняшний день сформирован ряд предпосылок и методик для проведения расчетов данного типа<sup>5</sup>. Поскольку моделирование обработки дробью как процесса контактного взаимодействия большого количества дробинок с обрабатываемой крупногабаритной деталью затруднено ввиду неприемлемо большой продолжительности расчетов и высокой трудоемкостью подготовки расчетной модели, применим метод нагружения деталей распределенными силами, приложенными к поверхности детали и вызывающими удлинение и растяжение поверхностного слоя. Однако стоит отме-

тить, известен ряд методик моделирования процесса дробеметного упрочнения, использующих технику генерации большого объема дробинок малого диаметра для симуляции упрочнения небольших деталей или их локальных участков<sup>6</sup> [8–13].

Таким образом, входными параметрами моделирования являются величины возникающих при упрочнении внутренних силовых факторов на различных конструктивных элементах деталей. С этой целью были разработаны имитаторы типовых элементов обода: криволинейного продольного ребра, имеющего изменяющийся угол наклона, и кармана, состоящего из участков полотна, двух продольных и двух поперечных ребер. На имитаторы (с помощью специальных прижимов) производилось крепление образцов – пластин, размерами 3x30x250 мм, изготовленных из материала детали – алюминиевого сплава 1933Т2. Схемы крепления образцов на имитаторы показаны на рис. 2, 3.

<sup>5</sup>Дьяк А.Ю. Система автоматизированной подготовки управляющих программ формообразования листовых деталей на контактных дробеметных установках с ЧПУ: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. Иркутск, 2005. 19 с. / Diyak A.Yu. The automated preparation system of the programs controlling sheet part shaping on contact shot peening machines with numerical control: Candidate's dissertation in technical sciences: 05.02.08. Irkutsk, 2005. 19 p.

<sup>6</sup>Скосоренко К.Н. Формообразование длинномерных панелей двойной кривизны методом раскатки ребер жесткости и дробеударной обработки в авиастроении: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.04. М., 1990. 16 с. / Skosorenko K.N. Shaping of long panels of double curvature by the method of rib rolling and shot peening in aircraft building: Candidate's dissertation in technical sciences: 05.07.04. M., 1990. 16 p.

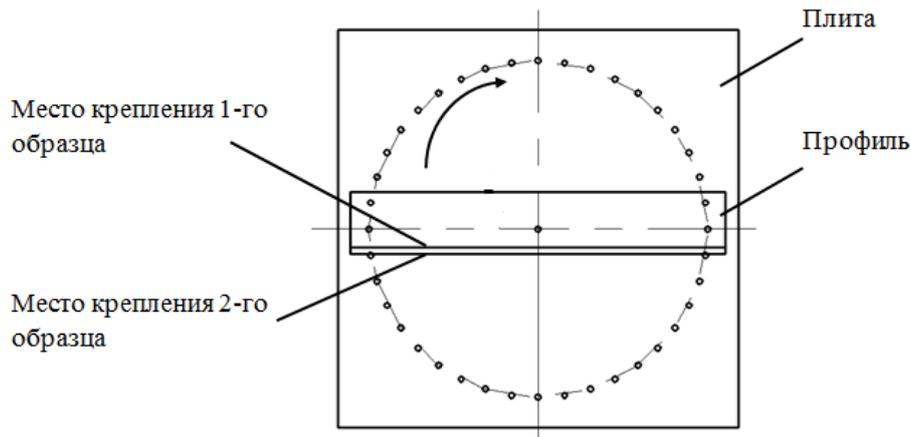


Рис. 2. Схема закрепления образцов на имитаторе «Редро»  
Fig. 2. Diagram of sample fixation on the simulator "Rib"

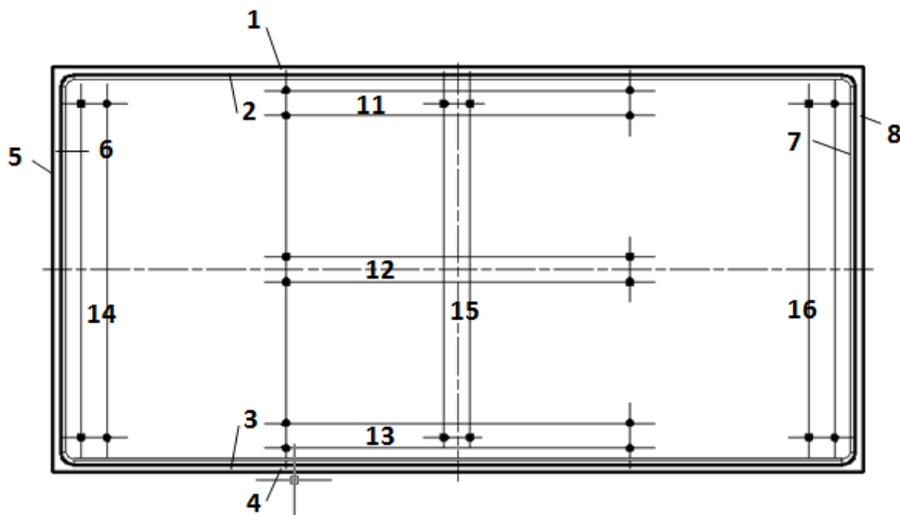


Рис. 3. Схема закрепления образцов на имитаторе «карман»  
Fig. 3. Diagram of sample fixation on the simulator "pocket"

На угловом профиле имитатора «ребро» образцы крепятся с двух сторон. После каждого цикла обработки предусмотрен поворот профиля по часовой стрелке на определенный шаг. На имитаторе «карман» закрепление образцов производится на каждом ребре с двух сторон и шести образцов на полотне. Обработка осуществляется в 2 цикла:

1) 8 образцов крепятся на ребрах (1–8), на полотне – 3 образца (11–13), ориентированные горизонтально;

2) на полотне крепятся 3 образца (14–16), ориентированные вертикально.

Обработка имитаторов с образцами производилась на установке для дробеударного упрочнения УДП-2-2,5 на типовых

режимах дробеударного упрочнения ободов, представленных в табл. 1.

Измерение стрел прогибов образцов до и после обработки производилось с помощью индикаторной планки, показанной на рис. 4.

По измеренным прогибам определяли удельное (на единицу ширины) растягивающее усилие, действующее после обработки, используя следующее в выражение:

$$F_{yA} = \frac{3EfH^3}{4a^2\left(\frac{H}{2} - z_c\right)}, \quad (1)$$

где  $E$  – модуль упругости 1-го рода;  $f$  – стрела прогиба образца, полученная при об-



Таблица 1  
Режимы дробебетного упрочнения образцов на установке УДП-2-2,5

Table 1

**Modes of shot peening hardening of samples at UDP - 2-2.5**

Параметры	Установ 1	Установ 2
Количество проходов	4	2
Частота вращения дробебетов 1–4, об./мин	420	420
Частота вращения дробебетов 5–8, об./мин	470	470
Подача, м./мин	3	1
Положение заслонок	1 (открыты на 50%)	3 (полностью открыты)



Рис. 4. Измерение прогиба пластины  
Fig. 4. Plate deflection measurement

работке;  $a$  – база измерения стрелы прогиба;  $H$  – толщина образца;  $z_c$  – расстояние от точки приложения растягивающей силы до обработанной поверхности (с учетом малых величин  $z_c$  при упрочнении ударными методами – максимальные сжимающие остаточные напряжения (ОН) близки к поверхности – в расчете ими можно пренебречь).

Результаты определения растягивающего усилия, действующего в кармане детали, представлены в табл. 2, на криволи-

нейном ребре в зависимости от угла его наклона – на рис. 5.

Используя рассчитанные значения удельного растягивающего усилия, возникающего на различных конструктивных элементах, с помощью моделирования возможно определение деформации детали при ее упрочнении. Для проведения конечно-элементных расчетов, связанных с определением деформированного состояния мало жестких деталей была использована система нелинейного конечно-элементного анализа LSTC LS-DYNA.

### Моделирование в САЕ системе дробебетного упрочнения деталей

Подготовка расчетной модели выполнялась с использованием стандартных возможностей препроцессора выбранной среды моделирования следующим образом. Осуществлялась оптимизация геометрии детали (рис. 6) путем осреднения толщины полотна детали при наличии большого числа переходов в рамках одного кармана детали, устранения технологических скруглений, галтелей, фасок и прочих элементов,

препятствующих разбиению детали на сетку, состоящую из гексаэдральных (прямоугольных) элементов. Выбор данного типа элементов обусловлен стремлением к обеспечению достаточной точности в совокупности с приемлемым количеством узлов сетки конечных элементов, определяющим «вес» модели и продолжительность расчета.



Таблица 2

Значения растягивающего внутреннего усилия в кармане детали

Table 2

Values of the tensile internal force in the part pocket

Маркировка образца	$f$ , м	$F_{уд}$ , Н/м
1	0,00124	30969
2	0,00036	8991
3	0,001	24975
4	0,00035	8741,25
5	0,00063	15734,25
6	0,00037	9240,75
7	0,00039	9740,25
8	0,00085	21228,75
11	0,00143	35714,25
12	0,00154	38461,5
13	0,00124	30969
14	0,00147	36713,25
15	0,00147	36713,25
16	0,00152	37962

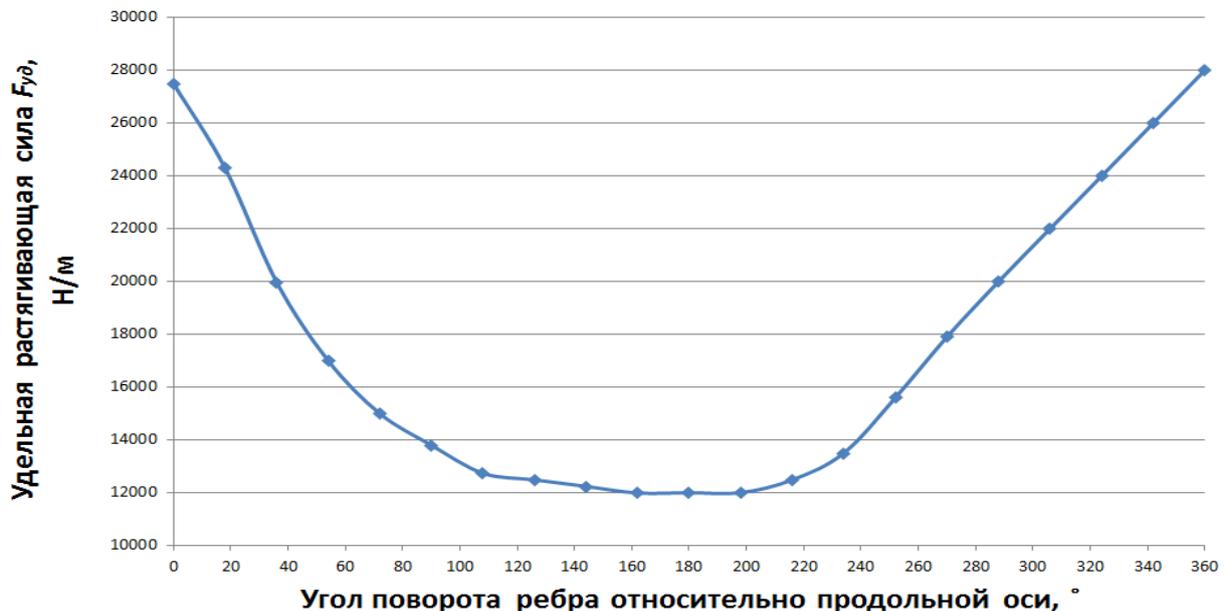


Рис. 5. Зависимость растягивающего внутреннего усилия от угла наклона ребра детали

Fig. 5. Dependence of the tensile internal force from the tilt angle of the part rib

Нагружение детали осуществлялось растягивающими силами, приложенными к конструктивным элементам детали, действующими по нормали к плоскости приложения с номинальными значениями, показанными на рис. 5.

Результаты моделирования прогнозируемой деформации обода в виде распределения относительных перемещений относительно двух взаимно перпендикулярных плоскостей, представленных на рис. 7.

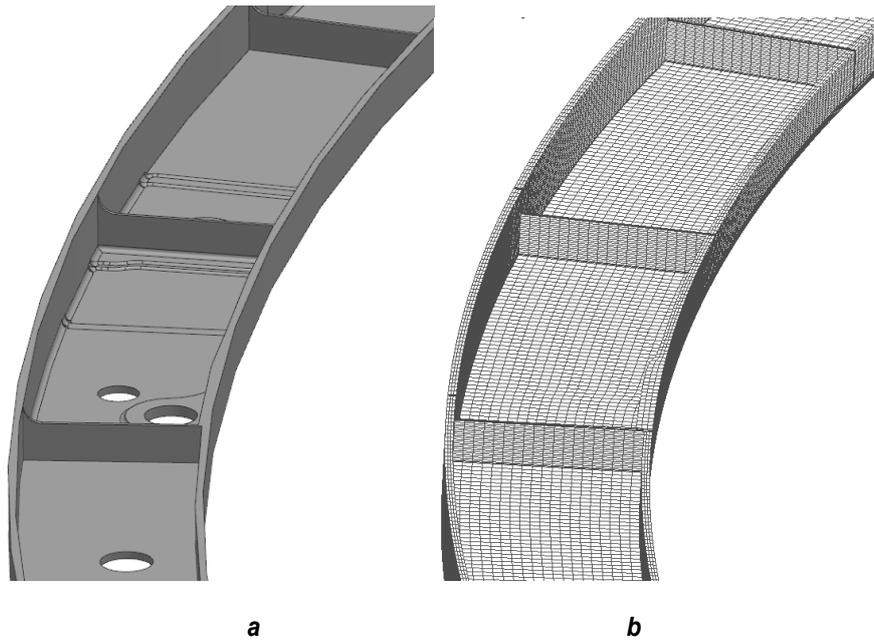


Рис. 6. Подготовка расчетной модели: а – CAD модель участка детали; б – оптимизированная модель, разбитая на сетку конечных элементов  
Fig. 6. Preparation of a calculation model: a – CAD model of the part section; b – optimized model divided into a finite element grid

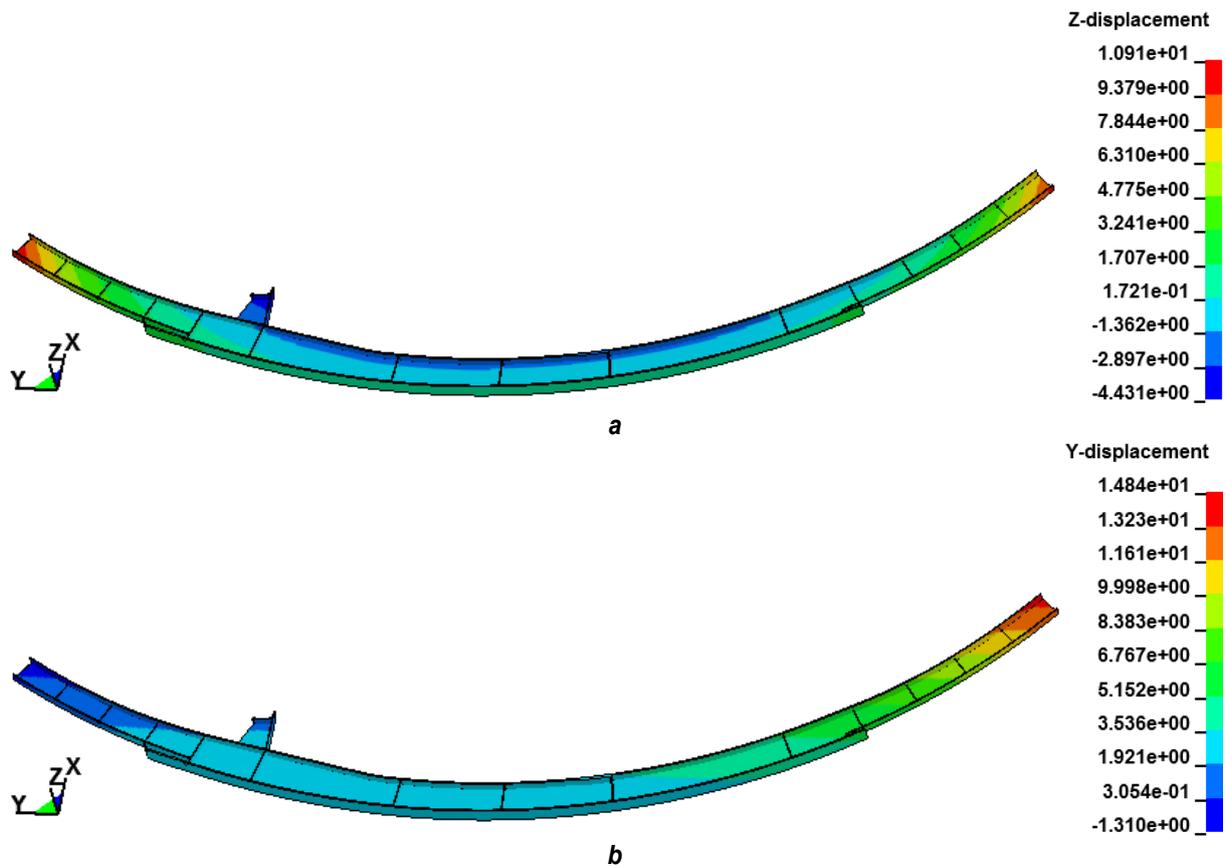


Рис. 7. Результаты моделирования в виде распределения перемещений:  
а – относительно оси OZ; б – относительно оси OY  
Fig. 7. Simulation results in the form of displacement distribution:  
a – relative to the OZ axis; b – relative to the OY axis



## Заключение

1. Превентивное деформирование позволяет минимизировать отклонения мало жестких деталей, подвергаемых упрочнению ударными методами.

2. Представленная методика направлена на определение внутренних силовых факторов, возникающих на различных конструктивных элементах при дробеметном упрочнении, с последующим их использова-

нием при моделировании прогнозируемых деформаций подкрепленных ребрами деталей.

3. Моделирование с помощью CAE-системы позволяет сократить затраты, связанные с изготовлением конструктивно-подобных образцов при определении прогнозируемых деформаций упрочняемых деталей.

## Библиографический список

1. Макарук А.А., Минаев Н.В. Технология формообразования и правки мало жестких деталей методами местного пластического деформирования // Высокоэффективные технологии проектирования, конструкторско-технологической подготовки и изготовления самолетов: материалы Всерос. (с междунар. участием) науч.-практ. семинара (г. Иркутск, 09–11 ноября 2011 г.). Иркутск, 2011. С. 117–121.
2. Макарук А.А., Минаев Н.В. Технология формообразования и правки мало жестких деталей раскаткой роликами // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 6 (2). С. 404–408.
3. Pashkov A.Ye., Makaruk A.A., Minaev N.V. Automation methods for forming and rectifying stiffened parts with roll-ing machines // International Journal of Engineering and Technology. 2015. Vol. 7. No. 6. 2030 p.
4. Беляков В.И., Мовшович А.Я., Кочергин Ю.А. Изготовление листовых деталей методом раскатки // Системы обработки информации. 2010. Выпуск 9 (90).
5. Пашков А.Е., Дияк А.Ю. Внутренние силовые факторы процесса дробеметной обработки листовых деталей // Сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. Иркутск: ИРГТУ, 2005. С. 171–177.
6. Пашков А.Е., Викулова С.В., Вяткин А.С., Макарук А.А. К вопросу обеспечения точности определения интенсивности поверхностного упрочнения // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2010. № 1(25). С. 102–107.

7. Fubin Tu. A sequential DEM-FEM coupling method for shot peening simulation. June 2017. Vol. 319. P. 200–212.
8. Murugaratnam K., Utilia S., Petrinic N. A combined DEM-FEM numerical method for Shot Peening parameter optimization. January 2015. Vol. 79. P. 13–26.
9. Miao H.Y., Larose S., Perron C., Evesque M. On the potential applications of a 3D random finite element model for the simulation of shot peening. Adv. Eng. Softw. 2009. Vol. 40. P. 1023–1038.
10. Zhuo Chen, Fan Yang Realistic Finite Element Simulations of Arc-Height Development in Shot-Peened Almen Strips // Journal of Engineering Materials and Technology. October 2014. Vol. 136 / 041002-1.
11. Пат. № 2566689, Российская Федерация. Способ правки длинномерной, подкрепленной ребрами детали и устройство для его осуществления (варианты). № 2013156560 / А.А. Макарук, А.Е. Пашков, А.В. Крючкин. № 2013156560; заявл. 20.12.2013; зарег. 29.09.15.
12. Пат. № 2581693, Российская Федерация. Устройство для обкатывания ребер панелей с регулируемой нагрузкой / А.Е. Пашков, А.А. Макарук. № 2014149583; зарег. 29.03.16.
13. Пашков А.Е., Дияк А.Ю. Определение параметров дробеударного формообразования-упрочнения при помощи CAD/CAM/CAE систем. Иркутск: Изд-во ИРГТУ, 1998. С. 59–62.

## References

1. Makaruk A.A., Minaev N.V. *Tekhnologiya formoobrazovaniya i pravki malozhestkih detalej metodami mestnogo plasticheskogo deformirovaniya* [Shaping and straightening technology for low rigid parts by the methods of local plastic deformation]. *Materialy Vserossijskogo (s mezhdunarodnym uchastiem) nauchno-prakticheskogo seminar "Vysokoeffektivnyye tekhnologii proyektirovaniya, konstruktorsko-tekhnologicheskoy podgotovki i izgotovleniya samoletov"* [Materials of All-Russian (with international participation) scientific and practical seminar "Highly effective technologies of design, technology preparation and production of

- planes", Irkutsk, 09–11 November 2011]. Irkutsk, 2011, pp. 117–121. (In Russian)
2. Makaruk A.A., Minaev N.V. Technology of shaping and dressing the low-rigid details by means of roller burnishing. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk* [Izvestiya of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2013, vol. 15, no. 6 (2), pp. 404–408. (In Russian)
3. Pashkov A.Ye., Makaruk A.A., Minaev N.V. Automation methods for forming and rectifying stiffened parts with rolling machines // International Journal of Engineering and Technology. 2015, vol. 7, no. 6, 2030 p.



4. Belyakov V.I., Movshovich A.Ya., Kochergin Yu.A. Production of sheet parts by the rolling method. *Sistemi obrabki informacii* [Information processing systems], 2010, Vipusk 9 (90). (In Russian)
5. Pashkov A.E., Diyak A.Yu. *Vnutrennie silovye faktory processa drobemetnoj obrabotki listovyh detalej* [Internal force factors of sheet part shot peening]. *Sbornik materialov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Proceedings of the International scientific and practical conference]. Irkutsk: IRGTU Publ., 2005, pp. 171–177. (In Russian)
6. Pashkov A.E., Vikulova S.V., Vyatkin A.S., Makaruk A.A. To the problem of ensuring the accuracy of surface hardening intensity determination. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling], 2010, no. 1(25), pp. 102–107. (In Russian)
7. Fubin Tu. A sequential DEM-FEM coupling method for shot peening simulation. June 2017, vol. 319, pp. 200–212.
8. Murugaratnam K., Utilia S., Petrinic N. A combined DEM-FEM numerical method for Shot Peening parameter optimization. January 2015, vol. 79, pp. 13–26.
9. Miao H.Y., Larose S., Perron C., Evesque M. On the potential applications of a 3D random finite element model for the simulation of shot peening. *Adv. Eng. Softw.* 2009, vol. 40, pp. 1023–1038.
10. Zhuo Chen, Fan Yang Realistic Finite Element Simulations of Arc-Height Development in Shot-Peened Almen Strips. *Journal of Engineering Materials and Technology*. October 2014, vol. 136 / 041002-1.
11. Makaruk A.A., Pashkov A.E., Kryuchkin A.V. *Sposob pravki dlinnomernoj, podkreplenoj rebrami detali i ustrojstvo dlya ego osushchestvleniya (variant)* [A method for straightening a long, reinforced rib part and a device for its implementation (variants)]. No. 2013156560]. Patent RF, no. 2566689, 2013.
12. Pashkov A.E., Makaruk A.A. *Ustrojstvo dlya obkativaniya reber panelej s reguliruemoj nagruzkoy* [A device for rolling the panel edges with adjustable load]. Patent RF, no. 2014149583, 2016.
13. Pashkov A.E., Diyak A.Yu. *Opredelenie parametrov drobepudarnogo formoobrazovaniya-uprochneniya pri pomoshchi CAD/CAM/CAE system* [Determination of shot-peening shaping-hardening parameters by means of CAD/CAM/CAE systems]. Irkutsk: ISTU Publ., 1998, pp. 59–62. (In Russian)

#### Критерии авторства

Макарук А.А., Хамаганов А.М. занимались проведением экспериментальных исследований по обработке имитаторов с образцами на установке для дробеударного упрочнения УДП-2-2,5, проанализировали результаты обработки, определили внутренние силовые факторы, возникающие на различных конструктивных элементах при дробеметном упрочнении. Пашков А.А. провел моделирование процесса упрочнения с использованием системы инженерного конечно-элементного анализа. Самойленко О.В. разработал имитаторы и образцы, занимался измерением кривизны до и после обработки. Макарук А.А., Хамаганов А.М., Пашков А.А., Самойленко О.В. имеют равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Authorship criteria

Makaruk A.A., Khamaganov A.M. have conducted experimental studies on simulated sample processing in the apparatus for shot-shock hardening of UDP-2-2,5, analyzed the results of determined internal forces and moments occurring in different structural elements under blast hardening. Pashkov A.A. simulated the hardening process using the system of engineering finite element analysis. Samoilenko O.V. developed simulators and samples, measured the curvature before and after processing. Makaruk A.A., Khamaganov A.M., Pashkov A.A., Samoilenko O.V. have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

#### Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.



Оригинальная статья / Original article  
УДК 004.415, 658.512.26  
DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-10-38-45>

## СПОСОБ ХРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ О СОСТАВЕ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ИЗДЕЛИЯ

© А.Ю. Логинов<sup>1</sup>, А.Е. Розенбаум<sup>2</sup>, О.В. Лимановская<sup>3</sup>, Д.В. Вольман<sup>4</sup>

<sup>1,2,4</sup>АО «Опытное конструкторское бюро «Новатор»,  
620017, Российская Федерация, Екатеринбург, пр-т Космонавтов, 18.  
<sup>3</sup>Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
620002, Российская Федерация, Екатеринбург, ул. Мира, 19.

**РЕЗЮМЕ.** **ЦЕЛЬЮ** работы является: определение принципов построения системы хранения и обработки информации о составе машиностроительного изделия; реализация системы хранения на основании сформулированных принципов. **МЕТОДЫ.** При построении системы состав изделия рассматривается в виде направленного ациклического графа, где компоненты – это вершины графа, а вхождения одних компонентов в другие – это дуги графа. В ходе работы предложен способ реализации системы с использованием механизма контекстов, учитывающих время внесения изменений. Для хранения информации применена реляционная модель с использованием неизменяемых табличных значений. Приведены практические **РЕЗУЛЬТАТЫ** построения такой системы хранения в АО ОКБ «Новатор» (г. Екатеринбург). Сделаны **ВЫВОДЫ** о том, что подобная схема работы с данными хорошо выдерживает большие нагрузки и может быть использована для решения сходных задач.

**Ключевые слова:** состав машиностроительного изделия, модель хранения данных, направленный ациклический граф, узлы, дуги, параметры, реляционная модель данных.

**Информация о статье.** Дата поступления 16 августа 2018 г.; дата принятия к печати 25 сентября 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 октября 2018 г.

**Формат цитирования.** Логинов А.Ю., Розенбаум А.Е., Лимановская О.В., Вольман Д.В. Способ хранения информации о составе машиностроительного изделия // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 10. С. 38–45. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-38-45

## METHOD OF STORING INFORMATION ON ENGINEERING PRODUCT COMPOSITION

A.Yu. Loginov, A.E. Rozenbaum, O.V. Limanovskaya, D.V. Volman

Experimental Design Bureau “Novator” JSC,  
18, Kosmonavtov pr., Ekaterinburg, 620017, Russian Federation  
Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,  
19, Mir St., Ekaterinburg, 620002, Russian Federation

**ABSTRACT.** The **PURPOSE** of this article is determination of the construction principles of the system for storing and processing of information on engineering product electronic structure as well as the implementation of the storage system based on the formulated principles. **METHODS.** When building the system the electronic structure of an engineering product is considered as a directed acyclic graph where the tree elements are graph nodes and facts of one component inclusion into another are graph edges. It is proposed to implement the system using the mechanism of contexts considering the time of introduction of changes. The relational data model with immutable table values is used for information storage. The article provides the practical **RESULTS** of building such a storage system in the Experimental Design Bureau “Novator”

<sup>1</sup>Логинов Александр Юрьевич, начальник отдела, e-mail: [LoginovAYu@gmail.com](mailto:LoginovAYu@gmail.com)  
Alexander Yu. Loginov, Head of the Department, e-mail: [LoginovAYu@gmail.com](mailto:LoginovAYu@gmail.com)

<sup>2</sup>Розенбаум Александр Евгеньевич, заместитель начальника отдела, e-mail: [RozenbaumAE@rambler.ru](mailto:RozenbaumAE@rambler.ru)  
Alexander E. Rozenbaum, Deputy Head of the Department, e-mail: [RozenbaumAE@rambler.ru](mailto:RozenbaumAE@rambler.ru)

<sup>3</sup>Лимановская Оксана Викторовна, кандидат химических наук, доцент, e-mail: [o.v.limanovskaya@urfu.ru](mailto:o.v.limanovskaya@urfu.ru)  
Oksana V. Limanovskaya, Candidate of Chemistry, Associate Professor,  
e-mail: [o.v.limanovskaya@urfu.ru](mailto:o.v.limanovskaya@urfu.ru)

<sup>4</sup>Вольман Денис Владимирович, начальник информационных технологий, e-mail: [VolmanDV@gmail.com](mailto:VolmanDV@gmail.com)  
Denis V. Volman, Head of the Department of Information Technologies, e-mail: [VolmanDV@gmail.com](mailto:VolmanDV@gmail.com)



JSC (Ekaterinburg). **CONCLUSIONS** are derived on the potential of the operation scheme under discussion to withstand big loads; therefore, it can be used to solve similar problems.

**Keywords:** *engineering product composition (electronic structure), data storage model, directed acyclic graph, graph nodes, graph edges, parameters, relational data model*

**Information about the article.** Received August 16, 2018; accepted for publication September 25, 2018; available online October 31, 2018.

**For citation.** Loginov A.Yu., Rozenbaum A.E., Limanovskaya O.V., Volman D.V. Method of storing information on engineering product composition. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 10, pp. 38–45. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-38-45. (In Russian).

## Введение

Создатели информационных систем, занимающихся хранением и обработкой информации о составе машиностроительного изделия [1], сталкиваются с решением задачи о выборе способа эффективного хранения данных. Для хранения информации о составе машиностроительного изделия могут применяться различные подходы.

Общими принципами построения таких систем являются следующие:

- система должна хранить информацию об элементах (машиностроительного изделия) и их свойствах (например, наименование, обозначение и др.);

- система должна хранить информацию о вхождении одного элемента в другой [2], а также о некоторых свойствах этого вхождения (например, количестве или цеховом маршруте вхождения);

- система должна обеспечивать версию вносимых изменений;

- в системе должна быть привязка ко времени: факт вхождения одного элемента в другой может начинаться и заканчиваться в определенное время, факт изменения значения свойства тоже должен быть привязан ко времени;

- в системе должна существовать возможность указать некоторый «контекст вхождения», чтобы впоследствии существовала возможность построить представление о составе машиностроительного изделия в некотором контексте. Например, при помощи контекстов удобно собирать состав сборочной единицы в зависимости от действия тех или иных предварительных извещений [3];

- система должна позволять осуществлять быструю выгрузку состава изделия при заданных начальных условиях.

Дополнительным ограничением, принимаемым во внимание при разработке данного способа, является то, что созданная модель хранения должна эффективно укладываться в реляционную модель данных [4, 5].

В настоящее время на российском рынке представлен большой спектр информационных PDM/PLM систем, занимающихся в том числе хранением и работой с информацией о составе машиностроительного изделия. Среди российских информационных систем наибольшее распространение получили следующие [6]:

1. Intermech Professional Solutions (ОДО «Интермех», Белоруссия).

2. Лоцман: PLM, Лоцман: КБ (АО «Аскон») [7].

3. T-Flex PLM (ЗАО «Топ Системы») [8–10].

4. 1С: PDM Управление инженерными данными (компания 1С, компания AP-PIUS) [11].

Кроме того, на российском рынке представлены зарубежные PLM системы. Самые популярные из них:

1. Teamcenter (Siemens PLM Software) [12, 13].

2. Solidworks PDM (PLM Group).

Каждая из указанных информационных систем, как российская, так и зарубежная, по-своему решают задачу хранения и работы с составом машиностроительного изделия. К сожалению, сведения о схемах

хранения и способах работы с информацией в таких системах являются закрытыми. Производители стараются не открывать подобные сведения, опасаясь конкуренции, а также из соображений безопасности. В связи с этим не представляется возможным сделать полноценный обзор подходов к хранению данных в коммерческих PDM/PLM си-

стемах. Единственной общей чертой, объединяющей все эти системы, является то, что хранение информации в них происходит в реляционных базах данных (как правило, это Microsoft SQL Server и PostgreSQL).

Целью данной статьи является описание способа работы с информацией о составе изделия, учитывающего принципы, сформулированные выше.

### Основная часть

Несмотря на то, что в машиностроении обычно оперируют терминами «состав изделия», «дерево состава изделия», наиболее точно структуру машиностроительного изделия отражает направленный ациклический граф [14], т.е. такой ориентированный граф, в котором отсутствуют направленные циклы, но могут быть «параллельные» пути, выходящие из одного узла и

разными путями приходящие в конечный узел.

Из примера, представленного на рис. 1, видно, что элементы машиностроительного изделия (изделия, сборки и детали) являются вершинами такого графа, а факты вхождения одного элемента изделия в другой могут быть представлены направленными дугами.

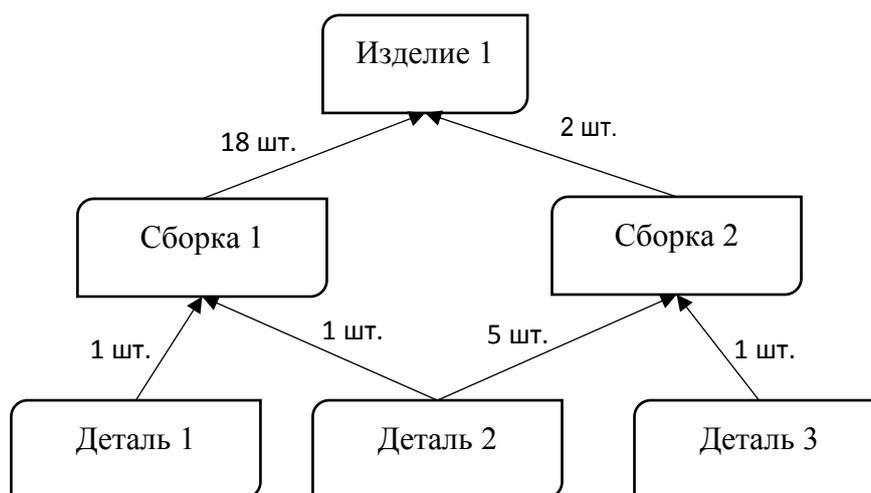


Рис. 1. Пример состава простого машиностроительного изделия  
Fig. 1. Example of the electronic structure of a simple engineering product

В ориентированном графе, описывающем машиностроительное изделие:

- каждый узел может иметь неограниченное количество предков и неограниченное количество потомков;
- каждый узел и каждая дуга обладают некоторым количеством параметров;
- необходимо учитывать временной контекст – значения параметров и существование вершин и дуг графа должны зависеть от времени;

– необходимо учитывать произвольные контексты – некоторые конкретные значения параметров и дуги могут существовать только в некотором произвольном контексте.

Для того чтобы можно было построить систему хранения данных [15, 16], удовлетворяющую указанным принципам, предлагается использовать следующие понятия и таблицы.



Таблица значений параметров представляет собой простейшую таблицу типа «ключ-значение» [17].

**Таблица 1**  
**Примеры таблицы сохранения значений параметров**  
**Table 1**  
**Examples of the parameter value storage table**

Идентификатор значения параметра	Значение параметра
0	«Изделие 1»
1	«Сборка 1»
2	«Сборка 2»
4	«Деталь 1»
5	«18 шт.»
6	«2 шт.»
7	«10 шт.»

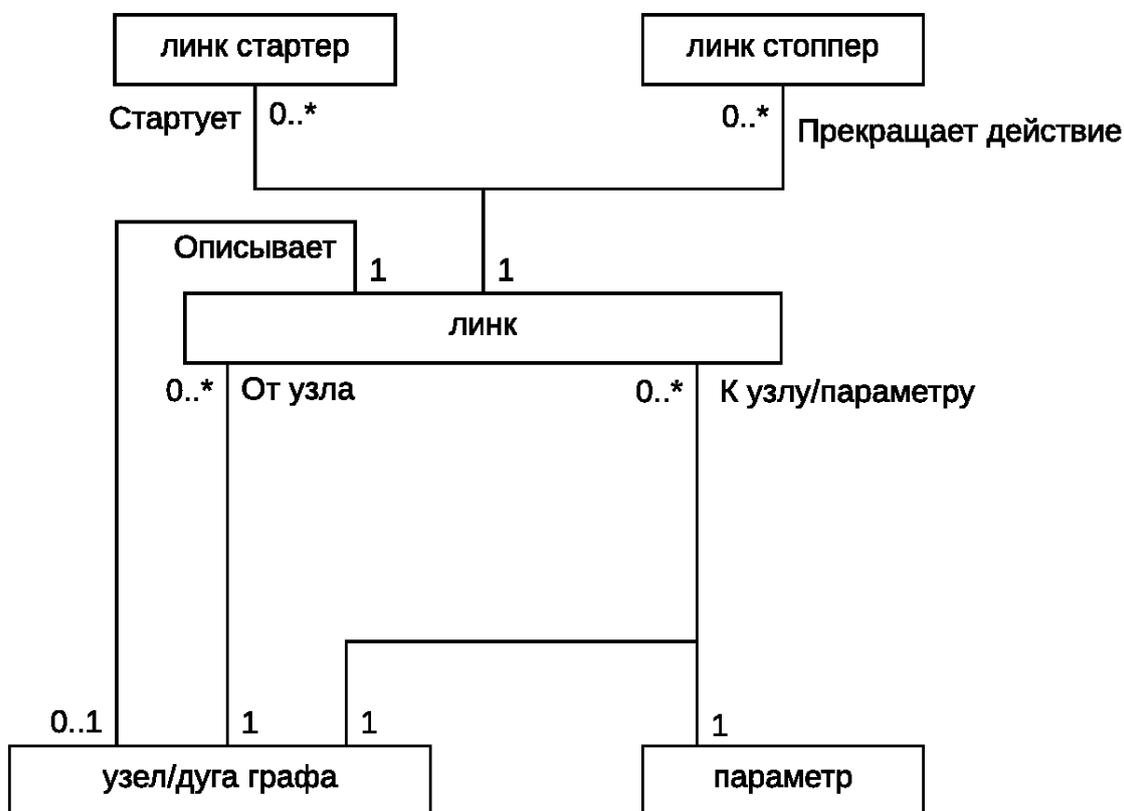
Для сохранения графа введем понятие линка (Link, англ. соединяющий), как не-

которой связующей сущности между различными элементами системы (см. рис. 2).

Линк может соединять узел графа (дугу графа) с конкретным значением параметра. Если между узлом (дугой) графа и конкретным значением параметра существует линк и он активен (понятие активности линка будет рассмотрено далее), то считается, что узел (дуга) графа обладает этим значением параметра.

Линк может соединять непосредственно узлы графа, т.е. сам выступать в роли дуги. Если между двумя узлами графа существует линк и он активен, то считается, что между этими двумя узлами графа есть дуга. При этом у линка должен быть обязательно заполнен параметр – ссылка на дугу графа. Все параметры вхождения одного элемента в другой (например, количество) указываются именно для дуги графа.

В табл. 2 представлены основные параметры линков для части узлов и дуг графа, представленного на рис. 1.



**Рис. 2. Схема представления данных**  
**Fig. 2. Diagram of data presentation**



Для вычисления активности линка, т.е. для учета влияния фактора времени и дополнительных контекстов, вводится понятие линкстартер (Link Starter, англ. стартовый линк) и линкстоппер (Link Stopper, англ. останавливающий линк).

Линкстартер – особая сущность, показывающая время и контекст начала действия линка. Линкстоппер – сущность, показывающая время и контекст окончания действия линка.

Линк считается активным в конкретный момент времени, если в заданном контексте существует линкстартер, созданный в этом контексте ранее рассматриваемого момента времени и в этом контексте не существует линкстопперов со временем действия ранее рассматриваемого момента. Рассмотрим табл. 3.

При внесении изменений в свойства элементов графа:

– создается новый линк, соединяющий элемент графа с новым значением его свойства;

– для нового линка создается линкстартер со временем и контекстом внесения изменений;

– для линка, указывающего на старое значение свойства, создается линкстоппер со временем и контекстом внесения изменений.

В табл. 2–4 приведен пример изменения свойства «Количества» у дуги, соединяющей «Изделие 1» со «Сборкой 1» по предварительному извещению ПИ1. Согласно данным из таблиц, количество меняется с «2 шт.» на «10 шт.» с 01 февраля 2018 г. в контексте предварительного извещения ПИ1.

Таблица 2

Пример таблицы сохранения линков

Table 2

Example of the link storage table

Идентификатор линка	Линк от	Линк к	Комментарий
0	Вершина графа «Изделие 1»	Значение параметра типа наименование «Изделие 1» (см. табл.1)	Наименование для вершины «Изделие 1»
1	Вершина графа «Сборка 1»	Значение параметра типа наименование «Сборка 1» (см. табл.1)	Наименование для вершины «Сборка 1»
2	Вершина графа «Сборка 2»	Значение параметра типа наименование «Сборка 2» (см. табл.1)	Наименование для вершины «Сборка 2»
3	Вершина графа «Изделие 1»	Вершина графа «Сборка 1»	Дуга графа «Изделие 1» – «Сборка 1»
4	Вершина графа «Изделие 1»	Вершина графа «Сборка 2»	Дуга графа «Изделие 1» – «Сборка 2»
5	Связь для линка 3	Значение параметра типа количество «18 шт.». (см. табл.1)	Установлено количество для дуги графа «Изделие 1» – «Сборка 1»
6	Связь для линка 4	Значение параметра типа количество «2 шт.». (см. табл.1)	Установлено количество для дуги графа «Изделие 1» – «Сборка 2»
7	Связь для линка 3	Значение параметра типа количество «10 шт.». (см. табл.1)	Изменение количества на связи между «Изделие 1» и «Сборка 1» (в контексте предварительного извещения ПИ1)



Таблица 3

Пример таблицы сохранения линкстартеров

Table 3

Example of the link starter storage table

Идентификатор линкстартера	Линк	Время начала действия линкстартера	Контекст
0	0	14:30:00 20.01.2018	–
1	1	14:30:00 20.01.2018	–
2	2	14:30:00 20.01.2018	–
3	3	14:30:00 20.01.2018	–
4	4	14:30:00 20.01.2018	–
5	5	14:30:00 20.01.2018	–
6	6	14:30:00 20.01.2018	–
7	7	00:00:00 01.02.2018	ПИ1

Таблица 4

Пример таблицы сохранения линкстопперов

Table 4

Example of the link stopper storage table

Идентификатор линкстопера	Линк	Время начала действия линкстопера	Контекст
0	6	00:00:00 01.02.2018	ПИ1

При добавлении в граф новой дуги между вершинами:

- создается новый линк, соединяющий две вершины графа;
- для нового линка создается линкстартер со временем и контекстом внесения изменений.

При удалении из графа существующей дуги между вершинами:

- находится линк, соединяющий две вершины графа;
- для этого линка создается линкстоппер со временем и контекстом внесения изменений.

Для того чтобы для вершины графа в заданном контексте в указанный момент времени получить множество дуг, выходящих из этой вершины, нужно выбрать из табл. 2 все линки, идущие от этой вершины к другим вершинам, для которых в указанном контексте существует линкстартер, созданный в этом же контексте ранее рассматриваемого момента времени и в этом контексте не существует линкстопперов со временем действия ранее рассматриваемого момента.

Для того чтобы для вершины (дуги) графа в указанном контексте в заданный момент времени получить множество действующих значений параметров, необходимо из табл. 2 выбрать все линки к параметрам из табл. 1, идущие от этой вершины (дуги) графа, для которых в указанном контексте существует линкстартер, созданный в этом же контексте ранее рассматриваемого момента времени, и в этом контексте не существует линкстопперов со временем действия ранее рассматриваемого момента.

Применяя указанные правила, можно построить систему, которая будет хранить информацию о вершинах и дугах графа, представляющего состав машиностроительного изделия. Причем эта информация будет храниться и рассматриваться с учетом временного и предметного контекста.

Кроме того, замечательным свойством данной модели хранения является тот факт, что для любых изменений данных на уровне реляционной модели применяются только операции вставки новых строк в



таблицы. Операции удаления и модификации данных, в сущности, отсутствуют. Это свойство позволяет значительно упростить обеспечение непротиворечивой параллельной многопоточной работы с системой, а

также естественным образом обеспечивает возможность постоянной асинхронной репликации изменений данных для всех подключенных клиентов, а в случае необходимости и между несколькими серверами.

### Заключение

Описанный способ был успешно применен при реализации хранения и обработки информации о составе машиностроительных изделий в АО «ОКБ «Новатор» при построении PDM-системы «Состав изделий v.2».

В качестве хранилища данных была использована реляционная база данных Microsoft SQL. Программная реализация была написана на языках T-SQL/C#.

В настоящее время в модели хранится и эффективно обрабатывается более 1,4 млн узлов, более 8 млн дуг графа.

Опыт реализации данного способа хранения информации в АО «ОКБ «Новатор» признан успешным.

Данный способ может быть применен при реализации хранения и обработки информации о составе машиностроительного изделия, а также в ряде сходных задач.

### Библиографический список

1. ГОСТ 2.053-2013. Электронная структура изделия. Общие положения – Введ. 01.06.2014 [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200106861> (15.05.2018)
2. ГОСТ 2.711-82. Схема деления изделия на составные части. Введ. 01.07.1983 [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200010856> (15.05.2018)
3. ГОСТ 2.503-90. Правила внесения изменений. Введ. 01.01.1991 [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200006353> (15.05.2018)
4. Блудов И.В. Особенности табличных выражений SQL и их соответствие с концепциями реляционной модели данных // Труды Института системного программирования РАН. 2013. Т. 24. С. 417–436.
5. Эльдарханов А.М. Обзор моделей данных объектно-ориентированных СУБД // Труды Института системного программирования РАН. 2011. Т. 21. С. 205–226.
6. Тимофеев П.Г., Ягопольский А.Г. Роль и значение PDM-систем при разработке технологического оборудования // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. № 10 (679). С. 73–81. DOI: 10.18698/0536-1044-2016-10-73-81
7. Ильин Б.А., Мелих С.А. Проектирование технологических процессов в PDM-системе ЛОЦМАН: PLM // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2008. № 48. С. 131–133.
8. Калачев О.Н., Баранов С.Ю. К вопросу подготовки оригинальных отчетов на основе исследования структуры БД ЛОЦМАН: PLM и запросов на языке T-SQL // Математика и естественные науки. Теория и практика: межвуз. сб. науч. тр. Министерство образования и науки Российской Федерации. Ярославль, 2015. С. 247–251.
9. Головкин К.С. Повышение эффективности конструкторско-технологической подготовки производства изделий «Отвод» и «Переход» // Прикладная информатика. 2012. № 4 (40). С. 31–37.
10. Овчинников А.Ю., Князева Н.Ю. Разработка методики построения комплексной детали при применении группового технологического процесса с использованием САПР "T-FLEX" // Вестник мордовского университета. 2016. № 3 (26) С. 312–324.
11. Нужный А.М., Барабанов А.В., Гребенникова Н.И., Сафронов В.В. Организация обмена технологическими данными в системе 1С:PDM // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11. № 4. С. 26–29.
12. Смелов В.Г., Кокарева В.В., Малыгин А.Н., Малыгина О.Н. Организация подготовки производства с помощью PDM-системы TEAMCENTER // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 6-4. С. 966–972.
13. Тороп Д.Н., Терликов В.В. Teamcenter. Начало работы. М.: ДМК Пресс, 2011. 280 с.
14. Оре О. Теория графов. М.: Либроком, 2009. 354 с.
15. Сарка Д., Лах М., Йеркич Г. Microsoft SQL Server 2012. Реализация хранилищ данных: учебный курс Microsoft. Экзамен 70-463. М.: Русская редакция, 2014. 792 с.
16. Бондарь А. Microsoft SQL Server 2012. СПб.: БХВ-Петербург, 2013. 608 с.
17. Клеменков П.А., Кузнецов С.Д. Большие данные: современные подходы к хранению и обработке // Труды Института системного программирования РАН. 2012. Т. 23. С. 143–158.



## References

1. GOST 2.053-2013. *Elektronnaya struktura izdeliya. Obshchie polozheniya* [GOST 2.053-2013. Product electronic structure. General provisions]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200106861> (accessed 15 May 2018)
2. GOST 2.711-82. *Skhema deleniya izdeliya na sostavnye chasti* [GOST 2.711-82. Diagram of product division into component parts]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200010856> (accessed 15 May 2018)
3. GOST 2.503-90. *Pravila vneseniya izmenenij* [GOST 2.503-90. Rules for introduction of changes]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200006353> (accessed 15 May 2018)
4. Bludov I.V. Features of SQL table expressions and their compliance with the concepts of the relational data model. *Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN* [Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS], 2013, vol. 24, pp. 417–436. (In Russian)
5. El'darhanov A.M. Overview of data models of object-oriented database management system (DBMS). *Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN* [Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS], 2011, vol. 21, pp. 205–226. (In Russian)
6. Timofeev P.G., Yagopol'skij A.G. The role and significance of PDM systems in the development of manufacturing equipment. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Mashinostroyeniye* [Proceedings of higher educational institutions. Machine Building], 2016, 10 (679), pp. 73–81. DOI: 10.18698/0536-1044-2016-10-73-81 (In Russian)
7. Il'in B.A., Melih S.A. Design of technological processes in the LOTSMAN PDM-system: PLM. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta informacionnykh tekhnologij, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2008, no. 48, pp. 131–133. (In Russian)
8. Kalachev O.N., Baranov S.Yu. *K voprosu podgotovki original'nykh otchetov na osnove issledovaniya struktury BD LOCMAN: PLM i zaprosov na yazyke T-SQL* [To preparation of original reports based on the study of LOTSMAN DB structure: PLM and T-SQL queries]. *Matematika i estestvennyye nauki. Teoriya i praktika: mezhvuz. sb. nauch. tr. Ministerstvo obrazovaniya i nauki Rossijskoj Federacii* [Mathematics and natural sciences. Theory and practice: interuniversity collection of scientific works of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation]. Yaroslavl', 2015, pp. 247–251. (In Russian)
9. Golovkin K.S. Improving efficiency of design and technological preparation of production of products "Branch" and "Transition". *Prikladnaya informatika* [Applied Informatics], 2012, no. 4 (40), pp. 31–37. (In Russian)
10. Ovchinnikov A.Yu., Knyazeva N.Yu. Development of a construction technique for the complex details in the application of group process with the use of CAD "T-FLEX". *Vestnik mordovskogo universiteta* [Mordova University Bulletin], 2016, no. 3 (26), pp. 312–324. (In Russian)
11. Nuzhnyj A.M., Barabanov A.V., Grebennikova N.I., Safronov V.V. Organizing the exchange technological data in the 1C: PDM. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Voronezh State Technical University], 2015, vol. 11, no. 4, pp. 26–29. (In Russian)
12. Smelov V.G., Kokareva V.V., Malyhin A.N., Malyhina O.N. Preproduction organization with PDM-system TEAMCENTER. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk* [Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2013, vol. 15, no. 6-4, pp. 966–972. (In Russian)
13. Torop D.N., Terlikov V.V. *Teamcenter. Nachalo raboty* [Teamcenter. Start of work]. Moscow: DMK Press Publ., 2011, 280 p. (In Russian)
14. Ore O. *Teoriya grafov* [Graph theory]. Moscow: Librokom Publ., 2009, 354 p. (In Russian)
15. Sarka D., Lah M., Jerkich G. *Microsoft SQL Server 2012. Realizaciya hranilishch dannyh: uchebnyj kurs Microsoft. Ekzamen 70-463* [Microsoft SQL Server 2012. Data storage implementation: Microsoft training course. Exam 70-463]. Moscow: Russkaya redakciya Publ., 2014, 792 p. (In Russian)
16. Bondar' A. *Microsoft SQL Server 2012*. Saint-Petersburg: BHV-Petersburg Publ., 2013, 608 p. (In Russian)
17. Klemenkov P.A., Kuznecov S.D. Big data: modern approaches to storage and processing. *Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN* [Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS], 2012, vol. 23, pp. 143–158. (In Russian)

### Критерии авторства

Логинов А.Ю., Розенбаум А.Е., Лимановская О.В., Вольман Д.В. совместно подготовили рукопись и несут ответственность за плагиат.

### Authorship criteria

Loginov A.Yu., Rozenbaum A.E., Limanovskaya O.V., Volman D.V. have prepared the manuscript for publication and bear the responsibility for plagiarism.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.



Оригинальная статья / Original article  
УДК 631.35-192:519.213  
DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-10-46-55>

## КОМПОЗИЦИОННЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ВРЕМЕНИ МЕЖДУ ОТКАЗАМИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ УБОРОЧНО-ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ

© Н.И. Овчинникова<sup>1</sup>, А.В. Косарева<sup>2</sup>

Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского,  
664038, Российская Федерация, Иркутский р-н, п. Молодежный.

**РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ.** Рассмотрены сельскохозяйственные уборочные процессы с транспортным обеспечением при одновременном параллельном выполнении технологических операций. Сельскохозяйственная уборочно-транспортная система представлена в виде двухкомпонентной технической системы, состоящей из уборочного агрегата и транспортного средства. Отказы рассматриваемой системы возникают по техническим, технологическим, эксплуатационным и организационным причинам отказов ее элементов. Время между отказами сельскохозяйственной транспортной системы является непрерывной случайной величиной и подчиняется определенному закону распределения. Проведен анализ используемых законов распределения в теории надежности технических систем, дано обоснование применения их композиций к оценке времени между отказами сельскохозяйственной уборочно-транспортной системы, получены композиционные формулы нового закона распределения, описывающие исследуемый временной параметр. **МЕТОД.** Оценка времени между отказами технической системы, состоящей из уборочного агрегата и транспортного средства, осуществлялась на основе композиционного метода, определяющего функцию плотности вероятности суммы двух непрерывных случайных величин, описываемых разными законами распределения. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Выведено более 10 композиционных формул плотности вероятности времени между отказами сельскохозяйственной уборочно-транспортной системы, позволяющими определять числовые характеристики и параметры новых распределений. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Комбинируя попарно законы распределения времени между отказами уборочного агрегата и транспортного средства, получены выражения плотности вероятности композиции законов распределения времени между отказами сельскохозяйственной уборочно-транспортной системы в целом. Результаты проведенных теоретических исследований могут быть использованы в экспериментальной работе и ее систематизации по изучению работоспособности сельскохозяйственных уборочно-транспортных систем, определению выходных параметров и выявления закономерностей между ними при совершенствовании различных технологических процессов в сельском хозяйстве, а также при расчетах надежности двухкомпонентных технических систем.

*Ключевые слова:* сельскохозяйственная уборочно-транспортная система, внезапный или постепенный отказ системы, непрерывная случайная величина, закон распределения, плотность вероятности распределения, композиция законов распределения.

**Информация о статье.** Дата поступления 29 мая 2018 г.; дата принятия к печати 28 сентября 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 октября 2018 г.

**Формат цитирования.** Овчинникова Н.И., Косарева А.В. Композиционный метод оценки времени между отказами сельскохозяйственной уборочно-транспортной системы // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 10. С. 46–55. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-46-55

## COMPOSITION ESTIMATION METHOD OF TIME BETWEEN FAILURES OF AGRICULTURAL HARVESTING AND TRANSPORT SYSTEM

© N.I. Ovchinnikova<sup>1</sup>, A.V. Kosareva<sup>2</sup>

Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky,  
Molodezhny settlement, Irkutsk region, Irkutsk district, 664038, Russian Federation

<sup>1</sup>Овчинникова Наталья Ивановна, доктор технических наук, заведующая кафедрой математики, e-mail: nata54@bk.ru

Natalia I. Ovchinnikova, Doctor of technical sciences, Head of the Department of Mathematics, e-mail: nata54 @ bk.ru

<sup>2</sup>Косарева Анна Викторовна, кандидат технических наук, доцент кафедры технического сервиса и общепромышленных дисциплин, e-mail: ankosar@mail.ru

Anna V. Kosareva, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Technical Service and General Engineering Disciplines, e-mail: ankosar@mail.ru



**ABSTRACT. PURPOSE.** The article deals with transport supported agricultural harvesting processes under simultaneous parallel execution of technological operations. The agricultural harvesting and transport system is presented in the form of a two-component technical system consisting of a harvesting unit and a vehicle. Failures of the system under consideration arise due to technical, technological, operational and organizational causes of its element failure. The time between the failures of the agricultural transport system is a continuous random variable and follows a certain distribution law. The conducted analysis of the distribution laws used in the theory of technical system reliability has allowed to justify the use of their compositions for estimating the time between the failures of the agricultural harvesting and transport system. Composite formulas for the new distribution law describing the time parameter under investigation are obtained. **METHOD.** The time between the failures of a technical system consisting of a harvesting unit and a vehicle is estimated on the basis of a composition method that determines the probability density function of the sum of two continuous random variables described by different distribution laws. **RESULTS.** We have derived more than 10 compositional formulas of probability density of time between the failures of the agricultural harvesting and transport system allowing to determine the numerical characteristics and parameters of new distributions. **CONCLUSION.** By combining the laws of time distribution between the failures of the harvesting unit and the vehicle in pairs the expressions of the probability density of the composition of the laws of time distribution between the failures of the agricultural harvesting and transport system as a whole are obtained. The results of the performed theoretical studies can be used in experimental work and its systematization on studying the efficiency of agricultural harvesting and transport systems, determination of output parameters and identification of regularities between them when improving various technological processes in agriculture, and also in calculating the reliability of two-component technical systems.

**Keywords:** *agricultural harvesting and transport system, sudden or gradual system failure, continuous random variable, distribution law, distribution probability density, composition of distribution laws*

**Information about the article.** Received May 29, 2018; accepted for publication September 28, 2018; available online October 31, 2018.

**For citation.** Ovchinnikova N.I., Kosareva A.V. Composition estimation method of time between failures of agricultural harvesting and transport system. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 10, pp. 46–55. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-46-55. (In Russian).

## Введение

Уборка урожая является завершающим этапом в технологической цепочке возделывания сельскохозяйственных культур. Уборочные работы в сельском хозяйстве, как правило, сопровождаются транспортными средствами, служащими для погрузки, транспортировки и разгрузки собранного урожая. При организации таких работ могут использоваться последовательное, параллельно-последовательное и параллельное выполнение уборочно-транспортных операций. Наиболее распространенным является параллельное выполнение нескольких технологических операций, когда уборочный агрегат и транспортное средство работают одновременно при параллельном движении в согласованном, ритмичном и синхронном режимах<sup>3</sup>.

При такой организации уборочных работ производственный цикл,  $T_u$  будет

включать продолжительность выполняемых операций,  $t_p$  и простои уборочного агрегата,  $t_{прост.}$  (включая простои, связанные с ожиданием транспорта,  $t_{ожид.}$ ) и транспортного средства (рис. 1).

В табл. 1 приведены примеры некоторых сельскохозяйственных уборочно-транспортных процессов, в которых используется параллельная организация выполнения технологических операций уборочным агрегатом и транспортным средством.

Для эффективного и качественного выполнения уборочных работ необходимо, чтобы уборочный агрегат и транспортное средство работали как единая сельскохозяйственная уборочно-транспортная система, состоящая из последовательно соединенных двух технических подсистем (рис. 2).

<sup>3</sup>Зангиев А.А. и др. Эксплуатация машинно-тракторного парка. М.: КолосС, 2008. 320 с. / Zangiev A.A. et al. Operation of the machine and tractor fleet. M.: KolosS, 2008. 320 p.



Уборочный агрегат

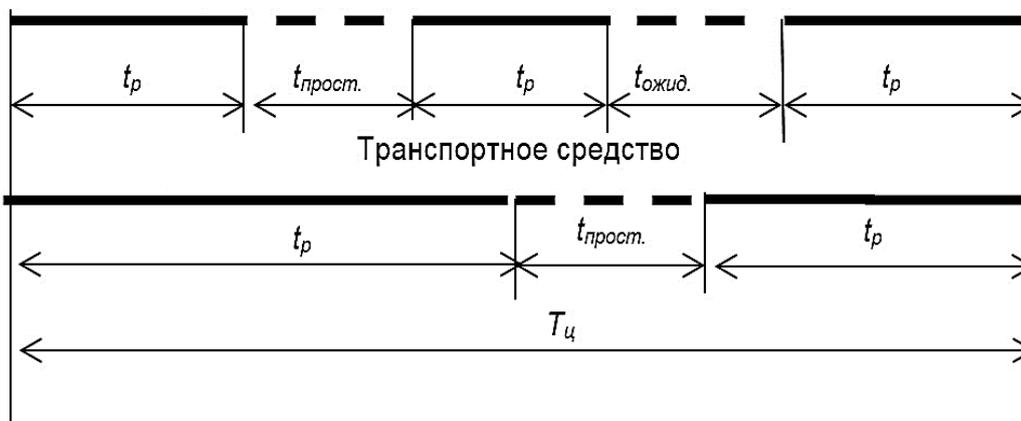


Рис. 1. Параллельная организация сельскохозяйственного уборочно-транспортного процесса  
Fig. 1. Parallel organization of agricultural harvesting and transport process

Таблица 1  
Сельскохозяйственные уборочно-транспортные процессы с параллельной организацией выполнения технологических операций

Table 1  
Agricultural harvesting and transport processes with parallel organization of technological operations

Сельскохозяйственный уборочно-транспортный процесс	Уборочный агрегат	Транспортное средство
Уборка зерновых культур	Зерноуборочные комбайны Агромаш 5101, New Holland TX, John Deere S-серия, Dominator, TORUM, Енисей	Автомобильный транспорт ЗИЛ ЗАСК-10Б, ЗИЛ ЗСК-10 Зил 130, ГАЗ 3307, КАМАЗ 5511
Заготовка кормов	Кормоуборочные комбайны КСК-600 «Палессе FS60», КСД- 2,0 Sterh, КПП-2, Рось-2	Прицепы, самосвальные при- цепы с наращенными бортами, автомобильный транспорт Зил 130, ГАЗ 3307, КАМАЗ 5511
Уборка картофеля	Картофелеуборочный комбайн КПК, Puma Pyra 2, Tectron 415	Прицепы, самосвальные при- цепы, автомобильный транспорт Зил 130, ГАЗ 3307, КАМАЗ 5511

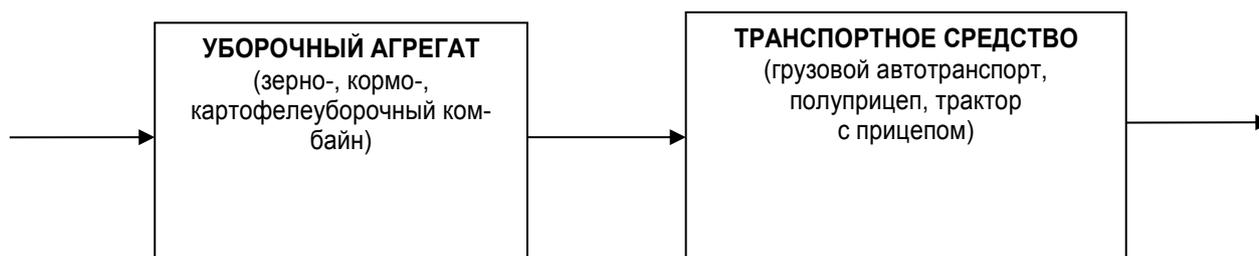


Рис. 2. Схема сельскохозяйственной уборочно-транспортной системы  
Fig. 2. Diagram of agricultural harvesting and transport system



Рассматриваемая система примет неработоспособное состояние, когда появятся «отказы» хотя бы одной из ее составляющих. Простои этой системы обусловлены техническими, технологическими, эксплуатационными, организационными причинами и носят случайный характер [6, 8]. Время между отказами сельскохозяйственной уборочно-транспортной системы является непрерывной случайной величиной (НСВ), которая, с вероятностной точки зре-

ния, считается полностью определенной, если известна ее функция распределения или плотность вероятности, т.е. задан закон ее распределения<sup>4</sup>. В связи с этим целью настоящих исследований является оценка времени между отказами сельскохозяйственной уборочно-транспортной системы на основе композиции законов распределения, описывающих время восстановления работоспособности уборочного агрегата и транспортного средства.

### Материал и метод исследования

Согласно природе возникновения отказов в теории надежности технических систем используют различные математические модели в виде законов распределения, описывающих внезапные и постепенные отказы. Анализ литературных источников [1–4] показывает, что внезапные отказы возникают при работе элементов технической системы в сложных агроклиматических и почвенных условиях, при нарушении правил вождения, при резких переключениях передач, попадании в машину посторонних предметов и т.п. Интенсивность  $\lambda$  внезапных отказов элементов системы практически постоянна на всем этапе их эксплуатации, если исключить периоды приработки и интенсивного старения. Этому условию удовлетворяет *экспоненциальный закон распределения*, применяемый для описания времени возникновения неисправностей в результате аварий и поломок. Экспоненциальный закон широко распространен из-за простоты расчетов параметров надежности, вследствие неизменности величины  $\lambda$ . В отличие от экспоненциального *нормальное распределение* используют для описания таких систем, потеря работоспособности которых связана в основном с постепенными отказами.

Постепенные отказы являются следствием длительной работы сил трения, высоких температур и других факторов, порож-

даемых условиями работы, нагрузочными режимами, состоянием обрабатываемого материала, коррозией, износом, накоплением деформаций и усталости металла, приводящие к изменению рабочих характеристик машин [5–11]. Примерами нормально распределенных случайных величин может служить наработка до отказа большинства технических систем, физико-механические свойства материалов изделий и сред взаимодействия, размеры и ошибки измерений деталей и т.д. [10, 12, 13]. *Усеченное нормальное распределение* наблюдается также при постепенных отказах элементов системы и используется при анализе надежности сложных систем с учетом выходов параметров технических элементов за допустимые пределы. Для описания отказов деталей и элементов металлоконструкций в результате усталостного разрушения используют *логарифмически нормальное распределение*. Отличительной особенностью распределения отказов элементов технических систем по технологическим причинам является их убывание по мере увеличения срока эксплуатации системы. Такому условию в большей степени удовлетворяет *распределение Вейбулла*. Распределение Вейбулла может быть применено для описания наработки до отказа ряда технических компонент системы, включая период приработки [2, 9].

<sup>4</sup>Гнеденко Б.В. Курс теории вероятностей: учебник для математических специальностей университетов. М.: Либроком, 2011. 485 с. / Gnedenko B.V. Course of the theory of probability: textbook for mathematical specialties of universities. M.: Librokom, 2011. 485 p.



Закон Рэлея используется при исследовании надежности технических систем, имеющих элементы с выраженным эффектом старения. *Бета-распределение* может быть использовано в случаях, когда требуется определить закономерности изменения долевого времени в общем балансе рассматриваемого отрезка работы системы. *Гамма-распределение* применяют для исследования случайных величин, имеющих асимметричный характер разброса ее значений, главным образом в случае накапливающихся отказов [5].

Краткий анализ возможностей применения законов распределения приводит к необходимости исследований их композиций [7] при допущении независимости случайных событий, заключающихся в выходе из строя уборочного агрегата или транспортного средства. Соответствующие этим событиям случайные величины, характеризующие время между отказами всей сельскохозяйственной уборочно-транспортной системы, также являются независимыми. Методический подход к составлению композиционных законов распределения достаточно полно освещен в математической литературе<sup>5</sup>. Применим *композиционный метод* в наших исследованиях. Пусть случайные величины  $X$  и  $Y$ , определяющие время между отказами уборочного агрегата и транспортного средства независимы и распределены по законам с соответствующими плотностями вероятностей  $f(x)$  и  $\varphi(y)$ . Тогда случайная величина  $Z = X + Y$ , характеризующая время между отказами рассматриваемой системы в целом, будет распределена по композиционному закону с плотностью вероятности  $f(z)$ , определяемой по формуле свертки:

$$f(z) = \int_0^z f(x) \cdot \varphi(z-x) dx. \quad (1)$$

Покажем применение этой формулы при составлении композиции экспоненциального закона и закона распределения Релея:

$$f(x) = \int_0^{\infty} \lambda e^{-\lambda x} \cdot 2\mu(z-x)e^{-\mu(z-x)^2} dx.$$

Для решения этого интеграла применим метод интегрирования по частям<sup>6</sup>:

$$\int u dv = uv - \int v du. \quad (2)$$

Введем обозначения

$$u = e^{-\lambda x}, dv = 2\mu(z-x)e^{-\mu(z-x)^2} dx, \\ du = -\lambda e^{-\lambda x} dx, v = -e^{-\mu(z-x)^2}.$$

Тогда получим

$$f(z) = -\lambda e^{-\lambda x} e^{-\mu(z-x)^2} \Big|_0^{\infty} - \lambda^2 \int_0^{\infty} e^{-\mu(z-x)^2} \cdot e^{-\lambda x} dx.$$

Последний интеграл  $J$  преобразуется следующим образом

$$J = \int_0^{\infty} e^{-\mu(z-x)^2} \cdot e^{-\lambda x} dx \\ = \int_0^{\infty} e^{-\mu x^2 + (2\mu z - \lambda)x - \mu z^2} dx.$$

Применяя таблицы значений несобственных интегралов

$$\int_0^{\infty} e^{-Ax^2 + 2Bx - C} dx = \sqrt{\frac{\pi}{4A}} e^{-\frac{AC - B^2}{A}},$$

получим

$$J = \int_0^{\infty} e^{-\mu x^2 + (2\mu z - \lambda)x - \mu z^2} dx = \sqrt{\frac{\pi}{4\mu}} e^{-\frac{4\lambda\mu z - \lambda^2}{4\mu}}.$$

<sup>5</sup>Лобков Н.И., Максимов Ю.Д., Хватов Ю.Л. Высшая математика. Т. 2: учеб. пособ. СПб.: Проспект, 2014. 416 с. / Lobkov N.I., Maksimov Yu.D., Khvatov Yu.L. Higher mathematics. Vol. 2: Learning aids. Saint Petersburg: Prospekt Publ., 2014, 416 p.



Таблица 2

**Двухкомпонентные композиции законов распределения времени между отказами сельскохозяйственной уборочно-транспортной системы**

Table 2

**Two-component compositions of laws of time distribution between the failures of agricultural harvesting and transport system**

Название закона распределения величины X	Название закона распределения величины Y	Плотность вероятности величины Z = X + Y
Нормальный $f(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a_x)^2}{2\sigma_x^2}}$	Нормальный $f(y) = \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y-a_y)^2}{2\sigma_y^2}}$	$f(z) = \frac{1}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{ z-(a_x+a_y) ^2}{2(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)}}$
Экспоненциальный $f(x) = \begin{cases} \lambda_1 e^{-\lambda_1 x}, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$	Экспоненциальный $f(y) = \begin{cases} \lambda_2 e^{-\lambda_2 y}, & y > 0 \\ 0, & y \leq 0 \end{cases}$	$f(z) = \begin{cases} \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} (e^{-\lambda_1 z} - e^{-\lambda_2 z}), & z > 0 \\ 0, & z \leq 0 \end{cases}$
Нормальный $f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}$	Лапласа $f(y) = \frac{1}{2\beta} e^{-\frac{ y-\xi }{\beta}}$	$f(z) = \frac{1}{2\beta} e^{-\frac{ z-\xi-a  \cdot \frac{\sigma^2}{2\beta}}{\beta}}$
Экспоненциальный $f(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$	Лапласа $f(y) = \frac{1}{2\beta} e^{-\frac{ y-\xi }{\beta}}$	$f(z) = \left( \frac{\lambda^2}{2\beta} + \frac{ \lambda }{2\beta^2} \right) e^{-\frac{ z-\xi }{\beta}}$
Гамма-Распределение $f(x) = \frac{\beta(\beta x)^{L-1}}{(L-1)!} e^{-\beta x},$ L-целое	Экспоненциальный $f(y) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda y}, & y > 0 \\ 0, & y \leq 0 \end{cases}$	$f(z) = \frac{\lambda \beta^2}{(L-1)!} e^{-\beta z} \cdot \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(-1)^{k+1} k! z^k}{(\lambda - \beta)^{k+1}}$
Экспоненциальный $f(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$	Релея $f(y) = 2\mu y e^{-\mu y^2}$	$f(z) = \lambda e^{-\mu^2 z^2} - \lambda^2 \sqrt{\frac{\pi}{4\mu}} e^{-\frac{4\lambda\mu^2 - \lambda^2}{4\mu}}$
Нормальный $f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}$	Релея $f(y) = 2\mu y e^{-\mu y^2}$	$f(z) = \frac{2\mu^2(z-a)}{\sqrt{1+\mu^2\sigma^3}} \cdot e^{-\frac{(z-a)^2}{2(1+\mu^2\sigma^2)}}$
Симпсона $f(x) = \begin{cases} \frac{x+a}{\alpha^2}, & -\alpha < x < 0 \\ \frac{x-a}{\alpha^2}, & 0 < x < \alpha \end{cases}$	Бета (β)- распределение $f(x) = \frac{1}{B(\alpha, \beta) x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1}},$ B(α, β) – бетта - функция	$f(z) = \frac{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}{\Gamma(\alpha)+\Gamma(\beta)} \cdot \left( z - \frac{\alpha}{\alpha+\beta} \right),$ α + 1, β > 0, 0 < z < 1, Γ(α), Γ(β) – гаммы - функции
Хи-квадрат (χ <sup>2</sup> )-распределение $f(x) = \frac{\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{n}{2}}}{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} x^{\frac{n}{2}-1} \cdot e^{-\frac{x}{2}}$	Экспоненциальный $f(y) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda y}, & y > 0 \\ 0, & y \leq 0 \end{cases}$	$f(z) = \frac{\lambda e^{-\lambda z} 2^{\frac{n}{2}+1}}{(1-2\lambda)^{n+1}}, z > 0, n > 2, \lambda < \frac{1}{2}$
Максвелла $f(x) = A e^{-\frac{\lambda}{2}}$	Экспоненциальный $f(y) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda y}, & y > 0 \\ 0, & y \leq 0 \end{cases}$	$f(z) = \left( \lambda + \frac{2\lambda^2}{\alpha\sqrt{\pi}} + \frac{\lambda^3}{2\alpha^2} \right) \cdot e^{-\lambda z + \left(\frac{\lambda}{2\alpha}\right)^2}$ α, λ > 0, z > 0
Арсинуса $f(x) = \frac{1}{\pi\sqrt{x(1-x)}}$	Симпсона $f(x) = \begin{cases} \frac{y+a}{\alpha^2}, & -\alpha < y < 0 \\ -\frac{y-a}{\alpha^2}, & 0 < y < \alpha \end{cases}$	$f(z) = \frac{B}{\pi} \left( \frac{\pi z}{2} - 1 \right),$ B > 0, 0 < z < 1



Краткий анализ возможностей применения законов распределения приводит к необходимости исследований их композиций [7] при допущении независимости случайных событий, заключающихся в выходе из строя уборочного агрегата или транспортного средства. Соответствующие этим событиям случайные величины, характеризующие время между отказами всей сельскохозяйственной уборочно-транспортной системы, также являются независимыми. Методический подход к составлению композиционных законов распределения достаточно полно освещен в математической литературе<sup>5</sup>. Применим *композиционный метод* в наших исследованиях. Пусть случайные величины  $X$  и  $Y$ , определяющие время между отказами уборочного агрегата и транспортного средства независимы и распределены по законам с соответствующими плотностями вероятностей  $f(x)$  и  $\varphi(y)$ . Тогда случайная величина  $Z = X + Y$ , характеризующая время между отказами рассматриваемой системы в целом, будет распределена по композиционному закону с плотностью вероятности  $f(z)$ , определяемой по формуле свертки:

$$f(x) = \int (z-x) \cdot \varphi(y) dy = \int f(x) \cdot \varphi(z-x) dx. \quad (1)$$

### Результаты исследования

В табл. 2 приведены полученные нами конечные результаты двухкомпонентных композиций законов распределения времени между отказами сельскохозяйственной уборочно-транспортной системы, используемые на кафедре эксплуатации машинно-тракторного парка и профессионального обучения Иркутского государственного аграрного университета им. А.А. Ежевского для исследований надежности технических систем сельскохозяйственного назначения.

Покажем применение этой формулы при составлении композиции экспоненциального закона и закона распределения Релея:

$$f(x) = \int_0^{\infty} \lambda e^{-\lambda x} \cdot 2\mu(z-x)e^{-\mu(z-x)^2} dx.$$

Для решения этого интеграла применим метод интегрирования по частям<sup>6</sup>:

$$\int u dv = uv - \int v du. \quad (2)$$

Введем обозначения

$$u = e^{-\lambda x}, dv = 2\mu(z-x)e^{-\mu(z-x)^2} dx, \\ du = -\lambda e^{-\lambda x} dx, v = -e^{-\mu(z-x)^2}.$$

Тогда получим

Окончательно, функция плотности вероятности нового закона распределения будет иметь вид:

$$f(z) = \lambda e^{-\mu z^2} - \lambda^2 \sqrt{\frac{\pi}{4\mu}} e^{-\frac{4\lambda\mu z - \lambda^2}{4\mu}}. \quad (3)$$

Подобным образом решаются и другие композиционные задачи.

Композиционный метод может быть обобщен на случай произвольного конечного числа независимых случайных величин за счет повторного применения операции свертки.

Следует упомянуть о так называемом «*свойстве устойчивости*». Закон распределения называется устойчивым, если при композиции двух законов этого типа получается снова закон того же типа<sup>7</sup>. Свойством устойчивости обладают весьма не-

<sup>5</sup>Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. Основные характеристики надежности и их статистический анализ. М.: Либроком, 2013. 584 с. / Gnedenko B.V., Belyaev Yu.K., Soloviev A.D. Mathematical methods in reliability theory. Basic characteristics of reliability and their statistical analysis. Moscow: Librocom Publ., 2013. 584 p.



многие законы распределения непрерывных случайных величин: нормальный, экспоненциальный и Коши. Особенностью нормального закона является то, что при композиции достаточно большого числа практически произвольных законов распределения суммарный закон оказывается сколь угодно близок к нормальному закону вне зависимо-

сти от того, каковы были законы распределения слагаемых. К неустойчивым законам распределения можно отнести закон равномерной плотности. Так при композиции двух законов равномерной плотности на участке от 0 до 1 мы получаем закон Симпсона, а при композиции трех и более законов равномерной плотности приближаемся к нормальному закону распределения.

### Заключение

Установлено, что на функционирование сельскохозяйственной уборочно-транспортной системы, состоящей из уборочного агрегата и транспортного средства, оказывают влияние технологические, технические, эксплуатационные и организационные причины, вызывающие внезапные и постепенные отказы. Время между отказами рассматриваемой системы является непрерывной случайной величиной, закон распределения которой находился с помощью композиционного метода, состоящего в операции свертки функций плотности вероятности,

описываемых суммарное время восстановления работоспособного состояния элементов системы.

Результаты проведенных теоретических исследований могут быть использованы в экспериментальной работе по изучению работоспособности уборочно-транспортных систем, определению выходных параметров и выявления закономерностей между ними при совершенствовании различных технологических процессов в сельском хозяйстве, а также при расчетах параметров надежности двухкомпонентных технических систем.

### Библиографический список

1. Азадов М.А. Анализ влияния параметров законов распределения на надежность элементов технических систем // Наука, техника и образование. 2017. № 5 (35). С. 27–32.
2. Лейфер Л.А., Кашникова П.М. Определение остаточного срока службы машин и оборудования на основе вероятностных моделей // Имущественные отношения в Российской Федерации – научный журнал. 2008. № 1 (76). С. 66–79.
3. Литвиненко Р.С., Идиятуллин Р.Г., Аухадеев А.Э. Анализ использования показательного распределения в теории надежности технических систем // Надежность и качество сложных систем. № 2(14). 2016. С. 18–24.
4. Литвиненко Р.С., Павлов П.П., Идиятуллин Р.Г. Практическое применение непрерывных законов распределения в теории надежности технических систем // Надежность – научно-технический журнал. 2016. Т. 16. № 4. С. 17–23.
5. Литвиненко Р.С., Ямщиков А.С., Багаев А.В. Практика применения гамма-распределения в теории надежности технических систем // Технические науки – от теории к практике: сб. ст. по матер. XVI Междунар. науч.-практ. конф. Новосибирск, 2016. Вып. 3 (51). С. 153–159.
6. Овчинникова Н.И., Харандаева П.В. О транспортном процессе при комбайновой уборке зерновых культур // Совместная деятельность с/х товаропроизводителей и научных организаций в развитии АПК Центральной Азии: Сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. (г. Иркутск, 25–27 марта 2008 г.). Иркутск, 2008. Ч. 3. С. 136–139.
7. Овчинникова Н.И. Решение системных задач машиноиспользования композиционным методом // Повышение эффективности использования и ремонта с.-х. техники: сб. науч. трудов ИСХИ. Иркутск, 1981. С. 36–40.
8. Ovchinnikova N.I., Jurev S.A. To the question of the estimation of reliability of process of cleaning bread grains to straight lines combine harvesting with "DOMINATOR SL-108 MAXI" // Materials of the International Scientific and Practical Conference "Information Technologies, Systems and Devices in Agroindustrial Complex", AGROINFO-2006, Section "Information Technologies in Engineering and Technical Support of Agroindustrial Complex" (Novosibirsk, 17–18 October, 2006). Novosibirsk, 2006. P. 508–512. Publishing House: Siberian Physical-Technical Institute of Agrarian Problems.
9. Овчинникова Н.И., Быкова М.А., Косарева А.В. Вероятностно-статистическая модель кормоуборочной



технологической системы // Чтения И.П. Терских. Актуальные вопросы инженерно-технического и биотехнологического обеспечения АПК: материалы VII науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Иркутск, 24–26 мая 2017 г.). Иркутск, 2017. С. 84–89.

10. Пахаев А.А., Попов Ф.А. Исследование и реализация методов расчета надежности программного обеспечения автоматизированных систем // Научные исследования: от теории к практике: материалы VII Междунар. науч.-практ. конф. (г. Чебоксары, 13 марта 2016 г.). Чебоксары, 2016. № 1 (7). С. 168–173.

11. Труханов В.М. Модель формирования постепенных отказов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2015. № 3. С. 77–79.

12. Larry H.C. Practical Methods for Analyzing the Reliability of Repairable Systems. URL: <https://www.reliasoftware.com> (13.05.2018)

13. Jodejko-Pietruczuk A., Werbińska-Wojciechowska S. Analysis of maintenance models' parameters estimation for technical systems with delay time. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*. 2014. 16 (2). P. 288–294.

## References

1. Azadov M.A. The analysis of the influence of parameters of distribution laws for dependability of technical system elements. *Nauka, tekhnika i obrazovanie* [Science, Technology and Education], 2017, no. 5 (35), pp. 27–32. (In Russian)

2. Lejfer L.A., Kashnikova P.M. Machinery and equipment remaining life determination based on probabilistic models. *Imushchestvennye otnosheniya v Rossijskoj Federacii – nauchnyj zhurnal* [Property Relations in the Russian Federation], 2008, no. 1 (76), pp. 66–79. (In Russian)

3. Litvinenko R.S., Idiyattullin R.G., Auhadeev A.E. Analysis of exponential distribution application in the theory of technical system reliability. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnyh sistem* [Reliability and Quality of Complex Systems], 2016, no. 2(14), pp. 18–24. (In Russian)

4. Litvinenko R.S., Pavlov P.P., Idiyattullin R.G. Practical application of continuous distribution laws in the theory of reliability of technical systems. *Nadezhnost' – nauchno-tekhnicheskij zhurnal* [Reliability], 2016, vol. 16, no. 4, pp. 17–23. (In Russian)

5. Litvinenko R.S., Yamshchikov A.S., Bagaev A.V. *Praktika primeneniya gamma-raspredeleniya v teorii nadezhnosti tekhnicheskikh sistem* [Practical application of gamma distribution in the reliability theory of technical systems]. *Tekhnicheskie nauki – ot teorii k praktike: sb. st. po mater. XVI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Technical Sciences – from theory to practice: collection of articles on the materials of XVI International scientific and practical conference]. Novosibirsk, 2016, Issue. 3 (51), pp. 153–159. (In Russian)

6. Ovchinnikova N.I., Harandaeva P.V. *O transportnom processe pri kombajnovoj uborke zernovykh kul'tur* [On transport process at combine harvesting of grain crops]. *Sovmestnaya deyatelnost' s/h tovaroproizvoditelej i nauchnykh organizacij v razvitii APK Central'noj Azii: Sbornik materialov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Joint activity of agricultural producers and scientific organizations in the development of the agro-industrial complex of Central Asia: Collection of articles of International scientific and practical conference, Irkutsk, 25–27 March 2008]. Irkutsk, 2008, Issue. 3, pp. 136–139. (In Russian)

7. Ovchinnikova N.I. *Reshenie sistemnykh zadach mashinoispol'zovaniya kompozicionnym metodom* [Solving

system problems of machine use by the composition method]. *Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya i remonta s.-h. tehnik* [Improving efficiency of agricultural machinery use and repair]. Irkutsk, 1981, pp. 36–40. (In Russian)

8. Ovchinnikova N.I., Jurev S.A. To the question of the estimation of reliability of process of cleaning bread grains to straight lines combine harvesting with "DOMINATOR SL-108 MAXI" // Materials of the International Scientific and Practical Conference "Information Technologies, Systems and Devices in Agroindustrial Complex", AGROINFO-2006, Section "Information Technologies in Engineering and Technical Support of Agroindustrial Complex" (Novosibirsk, 17–18 October, 2006). Novosibirsk, 2006, pp. 508–512. Publishing House: Siberian Physical-Technical Institute of Agrarian Problems.

9. Ovchinnikova N.I., Bykova M.A., Kosareva A.V. *Veroyatnostno-statisticheskaya model' kormouborochnoj tekhnologicheskoy sistemy* [Probabilistic and statistical model of a forage harvesting technological system]. *Materialy VII nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem "Chteniya I.P. Terskih. Aktual'nye voprosy inzhenerno-tekhnicheskogo i biotekhnologicheskogo obespecheniya APK"* [Proceedings of VII scientific and practical conference with international participation "I.P. Terskih Readings. Relevant issues of engineering and biotechnological support of the agro-industrial complex", Irkutsk, 24–26 May 2017]. Irkutsk, 2017, pp. 84–89. (In Russian)

10. Pahaev A.A., Popov F.A. *Issledovanie i realizaciya metodov rascheta nadezhnosti programmogo obespecheniya avtomatizirovannykh sistem* [Research and implementation of calculation methods of automated system software reliability]. *Materialy VII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. "Nauchnye issledovaniya: ot teorii k praktike"* [Proceedings of VII International scientific and practical conference "Scientific research: from theory to practice" Cheboksary, 13 March 2016]. Cheboksary, 2016, no. 1 (7), pp. 168–173. (In Russian)

11. Truhanov V.M. A gradual failure model. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Problems of Mechanical Engineering and Machine Reliability], 2015, no. 3, pp. 77–79. (In Russian)



12. Larry H.C. Practical Methods for Analyzing the Reliability of Repairable Systems. URL: <https://www.reliasoftware.com> (Available at: 13.05.2018)
13. Jodejko-Pietruczuk A., Werbińska-Wojciechowska S. Analysis of maintenance models' parameters estimation

for technical systems with delay time. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*. 2014, 16 (2), pp. 288–294.

#### **Критерии авторства**

Овчинникова Н.И., Косарева А.В. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

#### **Authorship criteria**

Ovchinnikova N.I., Kosareva A.V. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### **Conflict of interests**

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.



Оригинальная статья / Original article

УДК 519.233.5

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-10-56-66>

## ИМИТАЦИЯ КАК ОСНОВА ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

© А.В. Петров<sup>1</sup>

Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

**РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЮ** исследования является оценка роли и значения имитационных моделей в построении и эксплуатации цифровых двойников. **МЕТОДЫ.** Основными методами исследования являются системный анализ и методология, методика и методы построения имитационных моделей. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Проанализированы технологии создания и использования цифровых двойников и показано, что основой для их существования являются имитационные модели. Применяемые при этом информационные технологии являются обеспечивающим функционирование цифровых двойников инструментом, который не является определяющим фактором. Эффективность создания, использования и развития технологии цифровых двойников и теней обуславливается качеством построенной имитационной модели. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Для повышения качества имитационного ядра цифрового двойника сформулирован перечень задач, требующих решения. К их числу относятся автоматизация статистического анализа временных рядов, завершающаяся интуитивно понятным объяснением результатов анализа и генерацией наборов случайных чисел с определенными вероятностными свойствами; разработка методов оценки качества выбираемого инструментария имитационного моделирования; создание методик оценки качества трансформации ядра цифрового двойника в процессе ее модернизации по результатам натурной эксплуатации и формирование методик, методов, алгоритмического и программного обеспечения; создание цифровых двойников слабо формализованных систем.

*Ключевые слова:* цифровой двойник, цифровая тень, синтез имитационных моделей, программные продукты, параметры сравнения, универсальность, предметная область.

**Информация о статье.** Дата поступления 22 августа 2018 г.; дата принятия к печати 19 сентября 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 октября 2018 г.

**Формат цитирования.** Петров А.В. Имитационное моделирование как основа технологии цифровых двойников // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 10. С. 56–66. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-56-66

## SIMULATION AS THE BASIS OF DIGITAL TWIN TECHNOLOGY

A.V. Petrov

Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

**ABSTRACT.** The **PURPOSE** of the study is evaluation of the role and significance of simulation models in digital twin construction and operation. **METHODS.** The main research methods are system analysis and methodology, techniques and construction methods of simulation models. **RESULTS.** Having analyzed the technologies for digital twin creation and use, the author shows that simulation models form the basis for their existence. The information technology used in this case is a tool providing digital twin operation but it is not a determining factor. The quality of the constructed simulation model determines the efficiency of digital twin technology creation, use and development. **CONCLUSION.** To improve the quality of a digital twin simulation core a list of problems that need to be solved is formulated. They include automation of statistical analysis of time series, which is completed with an intuitive explanation of analysis results and generation of the sets of random numbers with certain probabilistic properties; development of quality assessment methods of the selected tools of simulation modeling; creation of quality assessment methods for digital twin core transformation in the process of

<sup>1</sup>Петров Александр Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированных систем, e-mail: petrov@istu.edu

Alexander V. Petrov, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Automated Systems Institute of Cybernetics, e-mail: petrov@istu.edu



its modernization based on the results of field operation and formation of methodology, methods, algorithmic tools and software; creation of digital twins of poorly formalized systems.

**Keywords:** *digital twin, digital footprint (digital shadow), synthesis of simulation models, software products, comparison parameters, universality, subject area*

**Information about the article.** Received August 22, 2018; accepted for publication September 19, 2018; available online October 31, 2018.

**For citation.** Petrov A.V. Simulation as the basis of digital twin technology. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 10, pp. 56–66. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-56-66. (In Russian).

## Введение

Моделирование как метод научного поиска и способ исследования известен достаточно давно и представляет собой замену реально исследуемой системы неким аналогом. Этот аналог повторяет именно те свойства исследуемого объекта, которые интересуют пользователя. Существует много классификаций модели и видов моделирования [1, 2]. Представленная ниже классификация может считаться приемлемой как с исторической точки зрения, так и с точки зрения наличия наиболее значимых приложений. Во-первых, это исторически первое возникшее логическое моделирование. Логическое моделирование представляет собой некую совокупность умозаключений, воспроизведенных мозгом человека, хранящимся в этом мозге и представляющим некий взгляд человека на ту или иную, систему ценностей, систему описаний. Она физически неосязаема и ее нельзя ощутить – это логика. Таких логических моделей достаточно много существует и, наверное, не будет преувеличением назвать все общественно-политические науки примерами логических моделей. Вторым, рядом стоящим по времени возникновения, методом моделирования является физическое моделирование, которое строится как инструментальный, подобно повторяющий физические свойства исследуемого объекта. Классический пример физической модели – детская игрушка. В современном мире физические модели занимают очень важное место. Они наиболее ярко отражены в так называемых тренажерных комплексах, когда человек, работающий на этом тренажере, подвержен

воздействию звука, вибраций, световых, визуальных и других эффектов. Это позволяет ему более качественно погрузиться в среду, для работы в которой он себя тренирует. Классический пример физической модели – это пластилиновая модель автомобиля в натуральную величину. Такой способ дизайнеры применяют до сих пор [3, 4]. Только построив пластилиновую модель автомобиля со всеми изгибами и формами, можно зрительно оценить, насколько это эстетично, красиво, приемлемо, воспринимаемо и т.д. А также нарисовать на компьютере любой автомобиль, вращать его, раскрашивать, смотреть под разным углом, издали или вблизи, но это – компьютер, экран, и он не дает такого качества визуального восприятия как взгляд человека на натуральный объект.

Третьим видом модели, который появился чуть позже логической и физической, является математическая модель. Считается, что это самый мощный вид моделирования. Математика, стремясь создать и развить способы формального описания всего и вся, конечно, является мощным инструментом исследования, развития и восприятия тех или иных явлений, объяснения различных взаимосвязей. При этом стоит помнить, что математики действуют в иммигрантском, корпоративном мире аксиом, правил, теорем, приемов и инструментов. Исторически математическое моделирование появилось с углубленным развитием математики. Особенно это, считаем, связано с появлением дифференциального исчисления и попыток с помощью математики



ческих формул описать те или иные физические явления в механике, в оптике, в целом, – в физике.

В наше время математические модели доказали свою эффективность и, конечно, являются мощнейшим инструментом науки. Но у него есть один очень крупный недостаток. Человечество стало создавать и использовать такие сложные объекты, настолько сложные по количеству элементов и взаимосвязей, методов функционирования, алгоритмов управления, потребностей в визуализации результатов, что математика не смогла предложить нам формализованное описание столь сложных систем, различных явлений, которые можно было применить, допустим, для адекватного и полного описания технологического процесса обогащения полезных ископаемых, для описания функционирования биологического объекта, общества и т.д. В данное время они отсутствуют. Математика может предложить только способы описания част-

ных явлений. Примеров этому много, и есть чем гордиться, но еще раз следует повторить, что окружающий нас мир настолько изменился с приходом новых технологических подходов, вычислительной техники и других инструментариев, что математика, к сожалению, пока не является таким универсальным способом представления. Она может описать некоторые элементы. Но эти элементы, отдельно описанные математикой, не составляют единое целое. Надо научиться как-то соединять разнородные математические аппараты. Допустим, возьмем дифференциальные уравнения и теорию случайных процессов, нужно суметь объединить вместе результаты расчетов, проведенных посредством различных математических инструментов. Эти проблемы и породили относительно новый вид моделирования, который вызван был именно необходимостью решения таких сложных задач. Этот метод получил название компьютерного или имитационного моделирования.

### Имитационное моделирование

Обратимся теперь к определению имитационного моделирования, возникшему в середине прошлого века, и рассмотрим его достоинства и недостатки.

В литературе [5] имитационное моделирование чаще всего определяют как численный метод исследования сложных систем, элементы которых описаны разнородным математическим аппаратом и объединены некой связующей моделью, которую иногда называют информационной. Сейчас, в силу терминологических особенностей, имитационную модель почему-то стали называть цифровой. Это недопустимо, потому что работаем на цифровой вычислительной технике, и все что она делает – цифровое. И ни цифра, ни понятие «цифровой» связывают отдельные элементы имитируемой системы, описанные разнородным математическим аппаратом. Объединение производится именно на информационном уровне, передаются данные. Цифра – лишь технический носитель информации и не более.

Имитационное моделирование является довольно дорогостоящим способом исследований в силу его уникальности. Каждая имитационная модель – штучный продукт, который потом может тиражироваться и развиваться. Кроме того, на стоимость разработки значительно влияет природа объекта исследования, крайне сложная в описании и понимании. Но главный недостаток имитационного моделирования состоит в том, что это численный метод, а, как известно, численные методы дают частные решения, которые необходимо воспринять как частный результат, и требуется провести серию численных экспериментов, результаты которых нужно усреднить и обобщить. Затем необходимо правильно объяснить результаты. Преимущество в такой объемной и сложной работе с имитационной моделью состоит в том, что другого не дано – имитируются сложные системы, не описываемые в полном объеме математически.



Достоинства имитационного моделирования отмечены в литературе [5]. Во-первых, это великолепный способ обучения. Выше уже упоминались тренажеры как типичные примеры соединения физической математической, физической и логической моделей, которые позволяют обучать персонал – авиационный и водительский состав, капитанов-судоводителей, космонавтов и так далее. Причина этой возможности в том, что в имитационной модели мы можем вводить разные ситуации в виде наборов исходных данных. И, следовательно, можем предлагать пользователю выработать некие ответные реакции на эти ситуации, которые им предлагает имитационная модель. Следующее достоинство состоит в том, что можно так формировать исходные данные, что они в реальной природе не могут существовать. То есть задать такие исходные данные, которые показывают, как исследуемая система работает в аварийном режиме или в том режиме, которого вообще реально не существует. И третье важное преимущество, которое в литературе практически не встречается. Это возможность постоянной настройки имитационной модели по результатам экспериментов. Так устроен человек, что, проводя исследование, он все глубже и глубже погружается в проблему, пытаясь понять объект изучения и поставить полученные знания себе на службу. Подходы непрерывно модернизируются, трансформируются. Имитационная модель создается и потом используется, подвергаясь при этом изменениям. Иными словами, происходит адаптация к окружающей обстановке, к полученным результатам, модернизации взглядов исследователей. Поэтому эта адаптивная способность имитационных моделей является тоже весьма и весьма важным преимуществом имитационного моделирования.

Имитационное моделирование обладает достаточно развитой системой инструментария, который позволяет строить сами модели, визуализировать и обрабатывать результаты, воспроизводить входные данные. Имеются программные инструменты для построения имитационных моделей.

При этом каждый из этих инструментов в существенной степени влияет на эффективность имитационного моделирования. К примеру, воспроизведение исходных данных. Крайне затруднительно и не эффективно экономически собирать исходные данные с реального объекта. И здесь приходят на помощь методы, алгоритмы и программные средства, позволяющие воспроизводить входные воздействия. При этом входные воздействия носят случайный характер и корректное воспроизведение вероятностной природы входных воздействий прямо влияет на адекватность имитационной модели, на качество понимания исследователя о том, как работает и как устроена система, которую он изучает. Методы генерирования входных воздействий достаточно подробно описаны в литературе [6–8]. К сожалению, пользователи или создатели имитационных моделей мало обращают внимание на правильность, с точки зрения математической статистики, представления вероятностных свойств. Необходимо сначала изучить, понять, описать эти свойства и под них подобрать соответствующие методы генерирования исходных случайных чисел или входных воздействий, а потом только использовать эти данные в имитационных экспериментах. Здесь пользователи зачастую идут по упрощенной схеме. Они говорят, что все исходные процессы имеют нормальный закон распределения и являются некоррелированными процессами. И это никак не доказывается и не объясняется. Есть несколько десятков законов распределения вероятностей, описывающих ряды наблюдений. Кроме того, имитационное моделирование – это метод исследования систем в динамике, во времени, а, следовательно, и входные воздействия должны каким-то образом быть связаны, содержать зависимость одного значения от другого. И на это исследователи тоже мало обращают внимание. Это крупный недостаток, связанный, скорее всего, с отсутствием должного уровня понимания вероятностной природы окружающего нас мира и ее влияния на качество построения имитационной модели.



Важными для интерпретации результатов имитации являются способы их статистической обработки и визуализации. Статистическая обработка – это формализованный инструментарий, который реализуется в различных статистических пакетах, позволяющих провести дисперсионный анализ и регрессионный анализ и сделать выводы. Визуализация же результатов в значительной степени обеспечивает правильность толкования этих результатов.

Существует дилемма между тем какие программные средства использовать для имитационного моделирования. Существует две категории. Первая категория – это универсальные программные средства, которых сейчас достаточно много. Это AnyLogic, GPSS и др. [9]. Но недостаток этих программных средств состоит в их универсальности и для того, чтобы их использовать, нужен специалист, т.е. человек, специально обученный и обладающий компетенциями в использовании этого программного продукта. Он может быть неспециалистом в моделируемой предметной области, но он обязан быть специалистом и разбираться в этом программном средстве. Дополнительный специалист – дополнительные расходы и не только финансовые. Обучать профильного специалиста, допустим, технолога того

или иного производства, владению универсальными программными средствами вряд ли рационально. Он не освоит универсальные программные средства на нужную глубину, так как для этого требуется специальное образование, не сумеет использовать все возможности.

Другая категория – уникальное программное средство, специально разработанное и созданное для имитации конкретного, допустим, технологического процесса или для конкретного изучения поведения конкретного аппарата или машины. Создание таких программных средств, конечно, дорого. Но и универсальное программное средство тоже не дешево. Уникальная разработка имеет одно очень весомое достоинство – эта уникальная разработка ориентирована на конкретную предметную область, и обучить технолога ее использованию гораздо проще, нежели владению универсальным программным продуктом. Но есть один недостаток. Такое специализированное программное средство необходимо поддерживать и эта поддержка потребует материальных затрат. Они являются дополнительными затратами, но с точки зрения применения уникальные программные средства имитационного моделирования более эффективны.

### Информационные технологии и имитационное моделирование

Параллельно с развитием имитационного моделирования происходило бурное развитие информационных технологий. К этому понятию нужно относиться достаточно аккуратно потому, что информационная технология – это не наука, а *технология* хранения информации и оперирования с нею и применения в различных областях. Например, бурное развитие системы автоматизированного проектирования в строительстве, машиностроении или других промышленных отраслях и так далее.

Вычислительная техника, естественно, тоже не стояла на месте. Производительность компьютеров как вычислительных аппаратов стремительно росла. Графическое отображение информации перешло

на качественно иной уровень. Мы сейчас даже не задумываемся о том, что наши смартфоны являются в значительной степени устройствами для графического отображения информации. Мы уже почти не используем персональные компьютеры в старом добром понимании системного блока и большого монитора. Мы работаем с ноутбуками и с планшетными компьютерами. Мы уже и на смартфонах имеем возможности работать как на персональном компьютере, конечно, не в том объеме, который нам предоставляет нормальный персональный компьютер в смысле вычислений и программирования.

Параллельно появилось очень много задач, требующих больших вычислений.



Примеров можно приводить много. Вот только один – метеорологические задачи, когда прогноз метеорологических условий требует значительных объемов вычислительных работ. Появились так называемые суперкомпьютеры, стала стремительно расти их мощность. Для университетов оказалось престижным владение суперкомпьютером. Есть задачи, нет задач – суперкомпьютер должен быть. И если задач такого уровня вычислительной сложности нет, то суперкомпьютер превращается в некий музейный экспонат. Но это дело организационно-административное.

Параллельно с миниатюризацией вычислительной техники и ростом возможностей планшетов, ноутбуков и смартфонов создано отвлечение в сторону больших вычислительных машин с гигантскими вычислительными мощностями и с гигантскими возможностями хранения информации. На базе этого появились центры обработки данных. Это серьезные технологические достижения, потому что они аккумулируют самые последние разработки в сфере вычислительной техники, в сфере хранения и использования информации, не говоря о таких обеспечивающих вещах, как системы кондиционирования или системы безопасности электроснабжения. Информация все больше становится материально востребованной. Существует расхожая фраза «кто владеет информацией – владеет миром», но это факт. Поэтому проблемам информационной безопасности стало уделяться все больше и больше внимания.

В 2003 г. профессор Технологического института штата Флорида Майкл Гривс, являясь помощником директора «Центра управления жизненным циклом и инновациями», написал статью «Цифровые близнецы и превосходство в производстве на основе виртуального прототипа завода» [10–12]. Автор выдвинул очевидный постулат, состоящий в том, что применение цифрового двойника происходит на протяжении всего жизненного цикла изделия с целью обеспечения его высокого уровня качества для потребителей. Сам Майкл Гривс признает, что термин «Цифровой двойник» и

производные от него придумал некий инженер, который работал в НАСА. Профессор Гривс сумел обобщить все технические и программные достижения, а также достижения информационных технологий, уровень производственных и непромышленных технологий идеей цифрового двойника – цифрового представления объекта, которое служит полным его описанием. Конечно, объекты бывают разные и поэтому информация о нем должна храниться с определенной защитой. Отсюда возникает необходимость использования имеющихся наработок в сфере информационной безопасности. В качестве примера можно привести *blockchain*, не говоря уж о традиционном шифровании.

Большие возможности по хранению информации проявили и другую сторону цифровых двойников, по которому очень успешно идут многие крупные фирмы (Boeing, Airbus, Siemens, Dassault и другие). Имеется некая машина и есть ее цифровой описание в виде цифрового представления чертежей, значений параметров, документации и тому подобное. Тогда такое описание дает полное представление о том, как функционирует эта машина, и можно накапливать персонифицированную для каждой машины информацию о ее функционировании и условиях, в которых она функционирует. По мере накопления информации можно прогнозировать на основе базовой цифровой модели (имитационной модели) направления модернизации как конкретной машины, так и всей конструкции в целом, и оценивать последствия этой модернизации.

Следует обратить внимание на ту фразу, которую в своей публикации приводит Майкл Гривс: «Меня не беспокоит структура данных. У нас есть необходимые инструменты, чтобы решать все подобные проблемы». Здесь речь идет о том, что профессор Гривс понимает, что информационные технологии, BigDate, *blockchain* – это просто инструмент. Это просто карандаш, просто напильник, которой необходимо использовать с наибольшей пользой. И вот этот карандаш, этот инструмент достиг такого состояния, что он подвинул пользова-



теля его применять. Это и вызвало появление понятия «цифрового двойника». Можно создавать имитационные модели, их пропагандировать, создавать программные средства, автоматизирующие процесс построения имитационных моделей, т.е. развивать это сторону моделирования. Но инструмент, который потом предложила жизнь, состоит в том, что он обеспечил эффективную во всех отношениях (включая безопасность) возможность оперирования с огромными объемами данных. Распределенные вычисления, blockchain, технические и программные возможности Интернета, телекоммуникации подталкивают создателей и пользователей имитационных моделей на другой уровень, они вытолкнули их на другой уровень, заставили их перейти на обобщение результатов на принципиально новом уровне. Колосально, что Майкл Гривс это заметил в 2003 г. Данная публикация пятнадцатилетней давности с течением времени породила как бы новое движение. Но, хотя на самом деле, ничего принципиально нового нет. Это просто инструментарий, использование информационных технологий, с одной стороны, и, с другой стороны – это просто имитационное моделирование в таком элементарном исполнении. Соединенные вместе они дают новый эффект. А то, что эффект проявляется больше всего там, где есть развитые математические теории, на базе которых строятся качественные имитационные модели (не те, которые носят интуитивный характер, то есть отражают взгляд создатели этой модели на понимание моделируемой системы). Формальные методики позволяют создать для самолета цифровую модель и с течением времени размножить ее в форме цифровых теней. Но имитационная модель как таковая, по сути, ничем не изменилась. Это (как есть) численный эксперимент с математическими моделями элементов сложной системы, объединенными информационной моделью, так и осталось. Если смотреть на развитие понятия и применения цифровых двойников, то это традиционный для науки процесс. Так было с кибернетикой и с генетикой. Вначале бум, большие ожидания, затем происходит спад, потому, что

возникает потребность в практической реализации. И затем начинается планомерная наработка группами энтузиастов каких-то результатов. Наконец, после этого спада наступает планомерное развитие. Такой путь прошла кибернетика. На нашей памяти старые книги, в которых написано было, что все будет автоматизировано, человек будет только пожинать результаты этого бурного ожидаемого роста новой науки. Это начало 50–60-х гг. XX в. Но этого сразу не произошло. Потребовалось время. Также и с цифровыми двойниками и цифровыми технологиями. Полтора десятка лет назад появилась идея, затем она как бы замерла.

С развитием информационных технологий она получила свое продолжение. Поэтому выводы, которые можно сделать, состоят в следующем. Во-первых, необходимо решить большой комплекс задач, связанных с развитием имитационного моделирования как такового. Во-вторых, предстоит решать крайне серьезную и исключительно важную задачу построения цифровых двойников слабо формализованных систем и объектов. В-третьих, это разработка инструментария, обеспечивающего количественную оценку эффективности проводимых действий. И, наконец, в-пятых, необходимо отойти или пережить рекламные моменты, когда выступают пропагандисты, а порой и не пропагандисты, особенно в интернете. Они рассказывают всем как это прекрасно – цифровой двойник, цифровые тени. Как все это потом будет, но при этом они, сколько удалось посмотреть, не дают каких-то времен оценок и не показывают, пусть не в деталях, собственные достижения. Очевидно, есть отрасли, допустим, военного назначения, где это уже есть и происходит. Но для массового человека этого пока нет. Когда объявляют лозунги о цифровой экономике и говорят, что мы все переходим на цифру, то за этим следует понимать, что, прежде чем это сделаем, необходимо проделать очень большую работу фундаментального, практического и агитационного вида для того, чтобы это стало действительно результатом, реально вошло в нашу жизнь.



И еще один момент, как бы предостережение: нужно очень аккуратно и взвешенно относиться к тем словам, которые произносят популяризаторы идеи цифрового двойника и цифровой тени. Во-первых, они практически подробно не говорят о том, что реально делают, опасаться тех цифровых проповедников, которые говорят о том, что могут все. Сейчас поговорим с тем или иным руководителем, министром, представителем администрации или корпорациями. В результате обеспечат нам финансовую поддержку, и тогда выдадим фантастический результат. Помним показанные по телевидению российские смартфоны. А, если не будет

этих денег, то жизнь остановится и идея цифровых технологий в промышленности, индустрия 4.0 остановится? Особое внимание необходимо обращать на практические результаты, достигнутые в этой сфере, пропагандировать эти практические результаты, не прожекты, а практически достигнутые результаты. А чтобы их было как можно больше, нужно развивать все: науку фундаментальную и прикладную, образование – готовить специалистов в этой сфере, и СМИ, чтобы они давали правдивую информацию, доводили ее в понятной форме до населения, и цифровая экономика вошла в нашу жизнь приемлемым путем.

### Основы технологии цифровых двойников

Майкл Гривс формулирует три требования к цифровым двойникам [10]. Первое требование состоит в необходимости визуального повторения облика исходного объекта. Это важное требование, но не критичное. Второе требование оговаривает необходимость объекту вести себя реалистично при проведении различных испытаний. И третье требование заключается в возможности получения информации, сформированной с помощью искусственного интеллекта, с оценкой текущего состояния объекта.

Обратим внимание читателя на два последних пункта. Это не что иное, как традиционное применение имитационной модели для решения реальных задач и не более того. Но возможности хранения информации, ее обработки и информационной защиты наводят на мысль профессора Гривса и его последователей на то, что можно за каждым выпускаемым экземпляром машины, агрегата, самолета, танка, человека закрепить его цифровое описание. Это описание будет с ним следовать по мере его жизненного цикла и храниться в цифровой среде. В него будут вноситься изменения по результатам эксплуатации и так далее. Все это носит название цифровой двойник в форме копии (цифровой тени) и это используется в рамках терминологии «Индустрия 4.0».

Таким образом, в основе любых циф-

ровых двойников лежит цифровая (суть имитационная) модель. Профессор А.И. Боровков, недавно выступая на одном из молодежных форумов [13, 14], говорил о том, что это цифровая модель строится на базе математических формализованных методов теорий упругости, надежности, прочности и так далее. Затем это цифровое описание следует за экземпляром изделия, снимаются его эксплуатационные характеристики и на этой цифровой модели проверяется, как работает экземпляр и как можно улучшить другие экземпляры. Но это не что иное, как имитационное моделирование по реальным данным. Профессор А.И. Боровков говорит и о том, что можно заведомо формировать так исходные данные, что они описывают некую аварийную ситуацию. А это опять же имитационное моделирование. На основании этого можно сделать вывод о том, что, если мы говорим о цифровых двойниках, цифровых тенях, цифровых технологиях, то следует понимать, что должна быть некая методология, сопровождаемая методиками, методами, инструментарием, включая программно-технические. Все это позволяет, во-первых, создать ядро цифрового двойника, то есть ту самую базовую имитационную модель, и, во-вторых, должна быть технология, обеспечивающая сбор информации о поведении двойников или цифровых теней и использовании ее для модерни-



зации базовой имитационной модели, то есть для модернизации выпускаемой продукции на базе опыта эксплуатации предыдущих вариантов или предыдущих экземпляров. Отсюда ясно, что если мы отойдем от новомодной цифровой терминологии, то в основе этих самых современных пропагандируемых и порой спекулятивных достижений, лежит элементарное имитационное модели-

рование. Та самая имитация, которая родилась в середине прошлого века и которая требует развития средств воспроизведения исходных данных, средств обработки результатов средств визуализации, средств автоматизированного построения имитационных моделей и всего того, что связано с классическим понятием компьютерного, цифрового – имитационного моделирования.

### Направления развития имитационного моделирования как базы цифровых двойников

При разработке имитационных моделей необходимо решать несколько параллельных задачи для того, чтобы повысить эффективность применения этого метода исследования.

*Первая задача* состоит в том, что необходима разработка таких методов, методик, программных продуктов и алгоритмов, которые бы максимально просто, но теоретически корректно обеспечивали быструю обработку рядов наблюдений и выдавали бы в качестве результата готовые ряды наблюдения заданного объема, обладающие автоматически выявленными вероятностными свойствами. Это как раз и есть те данные, которые снимаются с реального объекта и которые, как предполагается в рамках цифровых двойников, и будут использоваться для того, чтобы потом проводить виртуальное моделирование на реальных объектах. Это довольно сложная задача. Существуют программные продукты, проводящие статистический анализ достаточно эффективно, и математическая статистика дает хорошую базу для этого. Но они ориентированы, тем не менее, на продвинутого пользователя, на человека, знающего статистику и способного верно интерпретировать и трактовать результаты, выдаваемые пакетом. Иными словами, возникает задача создания условия непрофессиональному пользователю: корректно интерпретировать результаты статистической обработки. То есть цель состоит в том, чтобы разработать такие способы статистической обработки реальных рядов наблюдений, которые бы (1) предоставляли неспециалисту

понимать и трактовать результаты и (2) они должны давать возможность специалисту в предметной области получать случайные числа с оцененными вероятностными свойствами в неограниченном объеме. Это требует разработки специально подготовленных для такой работы методов генерирования случайных чисел с заданными вероятностными характеристиками. Эта задача существенно усложняется, если речь идет об объектах очень сложной вероятностной природы – многомерных случайных процессов или случайных полей.

*Вторая задача* состоит в необходимости разработать эффективные оценки выгоды индивидуальной разработки имитационной модели или применения универсальных программных средств построения имитационных моделей. Должна существовать некая формализованная методика принятия решения для того, чтобы можно было иметь четкую стратегию выбора способа построения имитационной модели. Исследователь должен иметь оценку о том, сколько это будет стоить не только в виде финансовых показателей, но и во временных или иных (ресурсных) параметрах.

*Третья и исключительно важная задача* связана с возможностями теоретического обоснования математических моделей. Речь идет о том, наиболее распространенными и, соответственно, эффективными являются цифровые двойники в тех областях, в которых имеются добротные математические описания в терминах, допустим, теории пластичности, теории упругости, сопротивления материалов или еще чего-то. То есть, такие добротные математически



обоснованные, проверенные на практике теории, которые обеспечивают построение адекватных математических моделей тех или иных процессов, протекающих в создаваемом или созданном аппарате, машине или изделии. В качестве примера используем самолет. Для этого объекта, несмотря на то, что подавляющее большинство вопросов можно решить чисто математически, тем не менее, затем начинается испытание этого самолета. Вносятся корректировки. Поэтому возникает задача построения или оценки применимости и качества выдаваемых результатов теми или иными математическими методами. Речь идет о формальных оценках и субъективных оценках.

Но что делать с теми машинами, агрегатами, технологическими процессами, в общем, системами, которые математические не формализованы. Возможны ли для таких систем цифровые двойники? Конечно, ответ здесь положительный. Вспомним наши смартфоны, которые «сами» формируют альбомы наших фотографий или показывают рекламу, «подсказанную» нашими поисковыми запросами. За каждым человеком, выходящим в интернет, следует его

цифровая тень. Но она же не формализована. Выше приведен только один пример. А есть другие примеры промышленного типа. Допустим технологии обогащения полезных ископаемых. В этой предметной области нет такой всеобъемлющей теории типа сопромата. Это трехфазная среда «жидкость-газ-твердое». Эти сложные физико-химические процессы, протекающие при обогащении, существенно усложнены еще и тем, что переработке подвергается минеральное сырье, которое имеет разные в одном том же месторождении физические свойства, влияющие на обогатительные процессы, на работу оборудования, а в ходе эксплуатации меняют свои параметры. Математических способов, описывающих эти процессы, можно сказать, не существует. Но, если обогатительные фабрики существуют, то и цифровые двойники и тени для них также обязаны существовать. Помимо обогащения и телекоммуникационных устройств наверняка можно найти такие примеры и такие области, в которых цифровые двойники должны быть.

## Выводы

Таким образом, анализ технологии создания и использования цифровых двойников показывает, что основой для их существования являются имитационные модели. Применяемые при этом информационные технологии являются обеспечивающим функционирование цифровых двойников инструментом, который не является определяющим фактором. Эффективность создания, использования и развития технологии цифровых двойников и теней обуславливается качеством построенной имитационной модели. Для повышения качества имитационного ядра цифрового двойника необходимо решить серию задач, таких как:

1) автоматизация статистического анализа временных рядов, завершающаяся

интуитивно понятным объяснением результатов анализа и генерацией наборов случайных чисел с определенными вероятностными свойствами;

2) разработка методов оценки качества выбираемого инструментария имитационного моделирования;

3) создание методик оценки качества трансформации ядра цифрового двойника (имитационной модели) в процессе ее модернизации по результатам натурной эксплуатации;

4) формирование методик, методов, алгоритмического и программного обеспечения создания цифровых двойников слабо формализованных систем.

## Библиографический список

1. Веников В.А. Теория подобия и моделирования. 2-е изд., доп. и перераб. М.: Высшая школа, 1976. 479 с.
2. ISO/IEC/IEEE 24765:2010 Systems and software engineering - Vocabulary/IEEE Std 1233-1998 (R2002)

IEEE Guide for Developing System Requirements Specifications.

3. Создавать инновации [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nissan.ru/experience->



nissan/trust/creators.html

4. Мои годы в General Motors [Электронный ресурс]. URL: <https://books.google.ru/books?isbn=5040994591>
5. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука / пер. с англ. М.: Мир, 1978. 418 с.
6. Быков В.В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике. М.: Советское радио, 1971. 328 с.
7. Ермаков, С.М., Михайлов Г.А. Статистическое моделирование. 2-е изд., доп. М.: ФИЗМАТЛИТ, 1982. 296 с.
8. Петров А.В. Моделирование процессов и систем. СПб.: Лань, 2015, 288 с.
9. Боев В.Д. Концептуальное проектирование систем в AnyLogic и GPSS World. Национальный Открытый Университет «ИНТУИТ», 2016. 543 с.
10. Эра трансформеров: «цифровые близнецы» уже

- рядом [Электронный ресурс]. URL: <https://sciencepop.ru/era-transformerov-tsfirovye-bliznetsy-uzhe-ryadom/> (12.06.2018)
11. Новая парадигма цифрового проектирования и моделирования глобально конкурентоспособной продукции нового поколения [Электронный ресурс]. URL: <http://fea.ru/news/6721> (12.06.2018)
12. Что такое цифровой двойник и для чего он нужен? [Электронный ресурс]. URL: <http://blogs.3ds.com/russia/digital-twin> (12.06.2018)
13. Новые парадигмы проектирования. Фабрики будущего, цифровые двойники [Электронный ресурс]. URL: <https://www.clipsoon.com/cbUkFx1WXfs/video.html> (12.06.2018)
14. Боровков А.И., Бурдаков С.Ф., Клявин О.И., Мельникова М.П., Михайлов А.А., Немов А.С., Пальмов В.А., Силина Е.Н.. Компьютерный инжиниринг. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 93 с.

### References

1. Venikov V.A. *Teoriya podobiya i modelirovaniya* [Theory of similarity and modeling]. Moscow: Higher School Publ., 1976. 479 p. (In Russian)
2. ISO / IEC / IEEE 24765: 2010 Systems and software engineering – Vocabulary IEEE Std 1233-1998 (R2002) IEEE Guide for Developing System Requirements Specifications.
3. *Create innovations* [To create innovation]. URL: <https://www.nissan.ru/experience-nissan/rust/creators.html> (In Russian)
4. *Moi gody years v General Motors* [My years at General Motors]. URL: <https://books.google.com/books?isbn=5040994591>
5. Shannon R. Simulation of systems - art and science, 1978, 418 p. (Russ. ed.: *Imitatsionnoye modelirovaniye sistem – iskusstvo i nauka*. Moscow, Mir Publ., 1978, 418 p.)
6. Bykov V.V. *Tsfirovoye modelirovaniye v statisticheskoy radiotekhnike* [Digital modeling in statistical radio engineering]. Moscow: Soviet radio Publ., 1971. 328 p. (In Russian)
7. Ermakov S.M., Mikhailov G.A. *Statisticheskoye modelirovaniye: uchebnoye posobiye* [Statistical modeling: Learning aids]. Moscow: Science Publ., 1982. 296 p. (In Russian)
8. Petrov A.V. *Modelirovanie processov i sistem* [Modeling of processes and systems]. Saint-Petersburg: Lan Publ., 2015, 288 p. (In Russian)

#### Критерии авторства

Петров А.В. полностью подготовил статью и несет ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

9. Boev V.D. *Kontseptual'noye proyektirovaniye sistem v AnyLogic i GPSS World* [Conceptual design of systems in AnyLogic and GPSS World]. National Open University "INTUIT", 2016, 543 p.
10. *[Era transformerov: «tsfirovyye bliznetsy» uzhe ryadom* The era of transformers: "digital twins" is near]. Available at: <https://sciencepop.ru/era-transformerov-tsfirovye-bliznetsy-uzhe-ryadom/> (accessed 12 June 2018)
11. *Novaya paradigma tsfirovogo proyektirovaniya i modelirovaniya global'no konkurentosposobnoy produktsii novogo pokoleniya* [A new paradigm of digital design and modeling of globally competitive products of new generation]. Available at: <http://fea.ru/news/6721> (accessed 12 June 2018)
12. *Chto takoe cifrovoj dvojniki i dlya chego on nuzhen?* [What is a digital twin and what is it for?] Available at: <http://blogs.3ds.com/russia/digital-twin> (accessed 12 June 2018)
13. *Novyye paradigmy proyektirovaniya. Fabriki budushchego, tsfirovyye dvoyniki* [New design paradigms. Factories of the future, digital twins]. Available at: <https://www.clipsoon.com/cbUkFx1WXfs/video.html> (accessed 12 June 2018)
14. Boroikov AI, Burdakov SF, Klyavin OI, Melnikova MP, Mikhailov AA, Nemov AS, Palmov VA, Silina E.N. *Komp'yuternyy inzhiniring* [Computer Engineering]. Saint-Petersburg: Polytechnic University Publ., 2012. 93 p. (In Russian)

#### Authorship criteria

Petrov A.V. has prepared the article for publication and bears the responsibility for plagiarism.

#### Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.



Оригинальная статья / Original article  
УДК 004.94 : 681.5.015.42 : 519.23  
DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-10-67-77>

## ФИЛЬТРАЦИЯ ВЫБРОСОВ В ЗАДАЧАХ СТАТИЧЕСКОЙ И ДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ В ЭТАЛОНАХ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ

© И.А. Серышева<sup>1</sup>

Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

**РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ.** Фильтрация аномальных измерений (выбросов) значений частоты водородных стандартов, входящих в состав групповых эталонов времени и частоты, позволит уменьшить алгоритмическую погрешность оценивания вектора состояния групповых эталонов. **МЕТОДЫ.** Используются методы помехоустойчивого оценивания в режиме статической и динамической обработки данных. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Для фильтрации выбросов в статическом режиме предложено использовать  $\alpha$ -усеченные оценки с неизвестным процентом выбросов. При динамической обработке данных выбросы отбраковываются при выходе получаемых на данном такте оценок за доверительные интервалы. Доверительные интервалы вычисляются на основе прогнозирующих моделей процессов изменения частоты, построенных на этапе статической обработки данных. Предложенные алгоритмы реализованы в Mathcad 15.0. Работоспособность предлагаемых методов проверена статистическим моделированием и подтверждена при обработке реальных данных, полученных в результате функционирования вторичного эталона ВЭТ 1-5. **ВЫВОДЫ.** Полученные результаты являются важным этапом при разработке формализованной методики оценивания состояния группового эталона времени и частоты в статическом и динамическом режимах, основанной на применении прогнозирующих моделей.

*Ключевые слова:* модели временных рядов, групповые эталоны, аномальные измерения, критерии обнаружения выбросов, аддитивные выбросы.

**Информация о статье.** Дата поступления 03 августа 2018 г.; дата принятия к печати 28 сентября 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 октября 2018 г.

**Формат цитирования:** Серышева И.А. Фильтрация выбросов в задачах статической и динамической обработки данных в эталонах времени и частоты // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 10. С. 67–77. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-67-77

## OUTLIER FILTRATION IN PROBLEMS OF STATIC AND DYNAMIC DATA PROCESSING IN TIME AND FREQUENCY STANDARDS

I.A. Serysheva

Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

**ABSTRACT. PURPOSE.** Filtration of anomalous measurements (outliers) of frequency values of hydrogen standards which form a part of the group standards of time and frequency will allow to reduce an algorithmic estimation error of the state vector of group standards. **METHODS.** The study employs the methods of noise-immunity estimation in the mode of static and dynamic data processing. **RESULTS.** It is proposed to use  $\alpha$ -trimmed estimates with an unknown percentage of outliers to filter the outliers in the static mode. In the case of dynamic data processing, the outliers are rejected if the estimates obtained at this stage go beyond the confidence intervals. The latter are calculated on the basis of the predictive models of frequency variation constructed at the stage of static processing of data. The proposed algorithms are implemented in Mathcad 15.0. The efficiency of the proposed methods has been verified by statistical modeling and confirmed by the processing of real data obtained as a result of VET 1-5 secondary standard operation. **CONCLUSIONS.** The received results form an important development stage of a formalized estimation procedure of the state vector of the time and frequency group standard in static and dynamic modes based on the use of predictive models.

<sup>1</sup>Серышева Ирина Анатольевна, старший преподаватель кафедры автоматизированных систем, e-mail: [sia\\_cyber@mail.ru](mailto:sia_cyber@mail.ru)

Irina A. Serysheva, Senior Lecturer of the Department of Automated Systems, e-mail: [sia\\_cyber@mail.ru](mailto:sia_cyber@mail.ru)



**Keywords:** *time series models, group standards, anomalous measurements, outlier detection criteria, additive outliers*

**Information about the article.** Received August 03, 2018; accepted for publication September 28, 2018; available online October 31, 2018.

**For citation:** Serysheva I.A. Outlier filtration in problems of static and dynamic data processing in time and frequency standards. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 10, pp. 67–77. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-67-77. (In Russian).

## Введение

В задачах оценивания состояния технических систем по результатам измерений обычно рассматривают два режима обработки данных: статическая обработка, когда считается, что все результаты измерений, выполненные до текущего такта, имеются в распоряжении исследователя (т.е. ведется обработка данных в режиме их накопления) и режим динамической обработки, когда в распоряжении исследователя имеются только данные, полученные на этом такте (т.е. ведется обработка данных в темпе их поступления) [1, 2].

Задачами статической обработки являются:

- отбраковка аномальных измерений или выбросов;
- получение начальных оценок измеримых величин;
- идентификация структуры процессов (если речь идет об оценивании состояния динамических систем);
- построение математической модели системы.

При динамической обработке решается задача параметрической оптимизации, т.е. задача получения оптимальных оценок вектора состояния динамической модели на основе ранее построенной ее математической модели [3].

Эталоны времени и частоты можно рассматривать как динамические стохастические системы и задачу обработки измерительной информации, получаемой в процессе «внутренних сличений» групповых эталонов, когда измеряются разности относительных отклонений частоты опорного генератора  $y_1^s$  и генератора с номером  $i$  где  $s$  – номер такта,  $n$  – число генераторов (водородных стандартов), входящих в состав группового эталона, как задачу оценивания состояния динамических стохастических систем. При этом результат измерения на такте  $s$  можно записать как  $z_i^s = y_1^s - y_i^s$ .

Для решения вышеперечисленных задач необходимо иметь первоначальные оценки значений частот водородных стандартов, входящих в состав группового эталона. В качестве таких оценок, как правило, используются оценки метода наименьших квадратов (МНК), вычисленные на такте  $s$  как среднее арифметическое результатов измерений [2]

$\hat{y}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=2}^n z_i$ . Данная оценка, как и вообще все МНК-оценки, не является помехоустойчивой и может содержать выбросы, т.е. результаты измерений, значительно превышающие по модулю все остальные элементы анализируемой выборки [4]. По данным ряда исследователей «наличие в результатах измерений от 5 до 20 процентов выбросов скорее правило, а не исключение» [5–7].

Анализ результатов внутренних сличений, выполненных во вторичном эталоне ВЭТ 1-5 ВНИИФТРИ (г. Иркутск), показал, что данные, полученные на суточных интервалах за 90 суток, содержат 6% выбросов (анализ причин, порождающих выбросы, не проводился, скорее всего, одна из причин связана с корректировкой рабочей шкалы эталона, вызванная требованиями технического задания).

Наличие выбросов, как и всех нестационарных составляющих процессов изменения частоты водородных генераторов, не позволяет строить прогнозирующие модели для этих процессов (динамические стохастические модели – модели авторегрессии-скользящего среднего



(APCC)), которые используются при динамической обработке данных.

Для фильтрации аномальных измерений и уменьшении смещенности получаемых МНК-оценок авторами была предложена методика первичной обработки данных, основанная на использовании альфа-усеченных джекнаиф оценок, которая показала по результатам статистического моделирования высокую эффективность даже при значительном числе выбросов (до 20%) [8]. Существенным ограничением применения указанных оценок является необходимость использования в составе группового эталона не менее 5 генераторов. На практике в настоящее время это требование не выполняется, поэтому использовать данный метод не представляется возможным.

Целью настоящей работы является разработка методов эффективной фильтрации выбросов при малом числе генераторов, входящих в состав эталона, как в статическом, так и в динамическом режимах.

Методологические основы алгоритмов для отсеивания аномальных результатов измерений представлены в работах [4, 5, 7, 9–17]. Наиболее полный обзор методов приведен в работах В.И. Марчука, С.В. Токаревой [10], J. Han, M. Kamber, J. Pei [13], С.С. Aggarwal [4, 14], А.И. Кобзарь [12], А.Ф. Фомина, О.Н. Новоселова, А.В. Плющева [15].

### Фильтрация выбросов в статическом режиме

Наиболее простой способ фильтрации выбросов в процессе статической обработки данных – вычисление выборочной дисперсии  $\sigma^2$  с последующей заменой данных, у которых отклонение среднего превышает  $K\sigma^2$  на помехоустойчивую оценку математического ожидания [4, 12, 10]. Анализ реальных данных показал, что достаточно хороший результат получен при  $K$  большем 10. Недостатком такого подхода является необходимость нахождения предварительной оценки величины  $K$  по эмпирической выборке, которую можно в этом случае рассматривать как обучающую.

Более общий подход к отбраковке выбросов в процессе статической обработки данных заключается в использовании помехоустойчивых оценок и процедуры проверки статистических гипотез [4, 12].

Альфа – усеченная оценка математического ожидания рассчитывается по формуле [5]:

$$C_v(\alpha, N) = \frac{1}{n} \left[ \sum_{i=[\alpha N]+2}^{N-[\alpha N]-1} y_i + [\alpha N] (y_{([\alpha N]+1)} + y_{(N-[\alpha N])}) \right],$$

где  $\alpha$  – доля выбросов,  $N$  – длина временного ряда,  $y_i$  –  $j$ -й член ряда.

Алгоритм вычисления этих оценок заключается в выполнении следующих этапов:

1. Выборка, состоящая из результатов измерений с выбросами, упорядочивается по возрастанию.

2. Отбрасывается ( $\alpha$ ) 100% данных, принадлежащих к минимальному и максимальному, по модулю значениям выборки.

3. По оставшимся элементам выборки находится оценка метода наименьших квадратов параметра сдвига (математического ожидания).

Поскольку величина  $\alpha$  на практике неизвестна, предлагается следующий итерационный алгоритм фильтрации аномальных измерений:

1. По выборке вычисляется оценка среднего квадратического отклонения  $S_1$ .

2. Отбрасываются минимальное и максимальное значения выборки.

3. Вычисляется оценка среднего квадратического отклонения  $S_2$  по оставшимся членам выборки.

4. Проверяется гипотеза  $H_0$ : различие между оценками  $S_1$  и  $S_2$  статистически незначимо.



Если гипотеза не отвергается, процедура отбраковки выбросов прекращается (предварительная оценка  $S_T$  полагается равной оценке, вычисленной по «усеченной» выборке). В противном случае переходим к шагу 1.

Очевидно, что после удаления всех выбросов («сверху» и «снизу» выборки) оставшаяся часть выборки будет однородной.

### Экспериментальная проверка алгоритма фильтрации в статическом режиме

Проиллюстрируем работоспособность предлагаемого алгоритма следующими имитационными экспериментами:

1. Генерировались ряды, имитирующие изменения частоты четырех генераторов ( $n = 4$ ) на основе процессов авторегрессии первого порядка с параметрами, описанными в табл. 1.

2. Чтобы избежать влияния переходных процессов на временные ряды в процессе их генерации, генерировались временные ряды, содержащие 200 точек, обработка данных началась с 101 такта. Таким образом, были получены стационарные составляющие временных рядов из 100 точек.

3. Полученные ряды использовались для вычисления рядов измерений  $z_i, i = 1(1)n$  ( $z_1 = y_1 - y_1 = 0$  – фиктивное измерение).

4. Вычислялись предварительные МНК-оценки частот всех генераторов по сымитированным рядам измерений.

5. Построенные таким образом ряды МНК-оценок соответствуют моделям, отличающимся от исходных. Параметры полученных моделей временных рядов (МНК-оценок) уточнялись с помощью ППП STATISTICA. Параметры построенных прогнозирующих моделей приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры моделей, соответствующих «истинным» рядам и рядам предварительных МНК-оценок

Table 1

Parameters of models corresponding to “true” series and series of preliminary least-squares estimates

Характеристика	Номер ряда			
	1	2	3	4
Исходная модель	APCC(1, 0)	APCC(1, 0)	APCC(1, 0)	APCC(1, 0)
Коэффициент авторегрессии исходной модели	$\varphi_1 = 0.3$	$\varphi_1 = 0.6$	$\varphi_1 = -0.4$	$\varphi_1 = 0.8$
Среднеквадратическое псевдослучайного шума исходной модели	0.1	0.2	0.3	0.4
Модель ряда МНК-оценок	APCC(1, 0)	APCC(1, 0)	APCC(1, 0)	APCC(1, 0)
Коэффициент авторегрессии модели ряда МНК-оценок	$\varphi_1 = 0.720340$	$\varphi_1 = 0.591338$	$\varphi_1 = 0.342108$	$\varphi_1 = 0.870343$
Оценка остаточной дисперсии	0.02504	0.03991	0.08314	0.08720
Математическое ожидание рядов оценок	0.096826	-0.043605	-0.010052	0.118953
Дисперсия	0.206261	0.243149	0.306613	0.574040

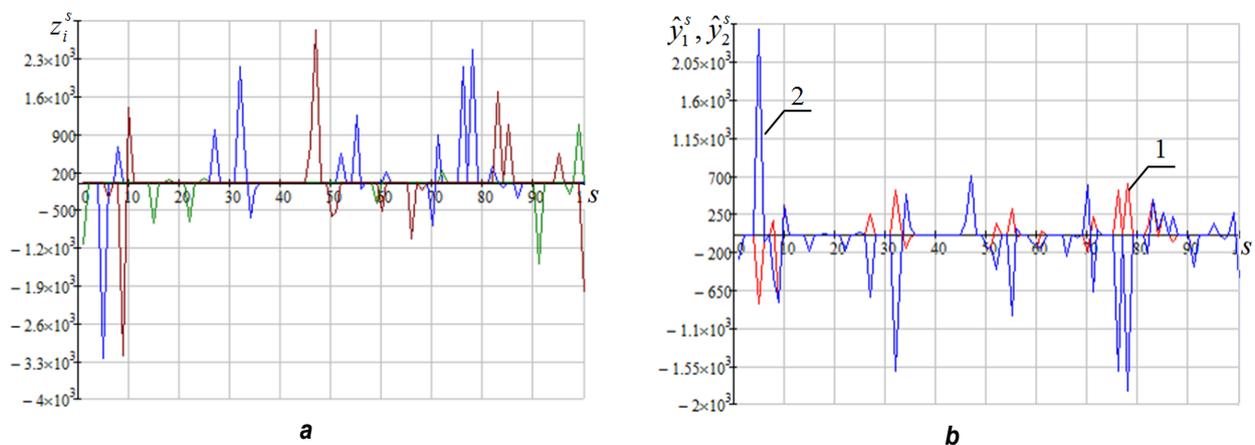
6. Проверялась эффективность алгоритмов оценивания состояния эталона времени и частоты, опирающихся на использование прогнозирующих моделей. Для сравнения эффективности алгоритмов, опирающихся на использование прогнозирующих моделей, по сравнению с алгоритмами метода наименьших квадратов, использовалась сумма квадратов отклонений рядов оценок от «истинных» рядов (т.е. сгенерированных рядов), обозначенная как  $\varepsilon_i$ . Для опорного генератора алгоритма метода наименьших квадратов получено  $\varepsilon_1 = 5.421$ , а для алгоритма с учетом прогнозов,  $\varepsilon_1 = 1.601$ , т.е. примерно в 3,5 раза лучше, чем у альтернативного алгоритма. Что подтверждает эффективность использования прогнозирующих моделей при оценке состояния эталонов (при работе со стационарными составляющими процессов изменения частоты).

В теории временных рядов наиболее распространено три модели погрешностей наблюдений: 1) аддитивная; 2) замещающая; 3) инновационная [14, 17]. В [6] показано, что для обработки частотно-временной информации наиболее подходящей является аддитивная модель, используемая в данной работе для имитации рядов измерений с выбросами.

Экспериментальная проверка алгоритма при наличии выбросов проводилась следующим образом:

1. В ряды измерений  $z$ , полученные способом, описанным выше, вносились аддитивные выбросы, момент возникновения и амплитуда которых определялись случайным образом.
2. Процент выбросов задавался исследователем и изменялся в диапазоне от 2 до 20%.
3. При моделировании генерировалось два типа потоков выбросов: 1 – ординарные потоки (на одном такте возможен выброс только в одном из рядов измерений), 2 – неординарные потоки (в один и тот же момент возможно возникновение нескольких выбросов).

На рис. 1 а представлены ряды измерений с 15%-ми ординарными выбросами, на рис. 1 б – соответствующие этим рядам измерений ряды МНК-оценок для опорного и второго генераторов.



**Рис. 1. Ряды с 15% ординарными выбросами: а – ряды измерений; б – ряды МНК-оценок частот опорного (кривая 1) и второго (кривая 2) генераторов**

**Fig. 1. Series with 15% ordinary outliers: a – series of measurements; b – series of least square estimates of frequencies of reference (curve 1) and second (curve 2) generators**

Сводные результаты имитационных экспериментов приведены в табл. 2. На рис. 2 а приведены ряды измерений после работы алгоритма фильтрации аномальных измерений в статическом режиме для случая 15%-х ординарных выбросов. Графики зависимостей суммы квадратов отклонений рядов оценок, полученных с учетом прогнозов и с использованием предложенного алгоритма фильтрации, от «истинных» рядов для опорного генератора от процентов ординарных и неординарных выбросов приведены на рис. 2 б. Поскольку предлагаемый алгоритм



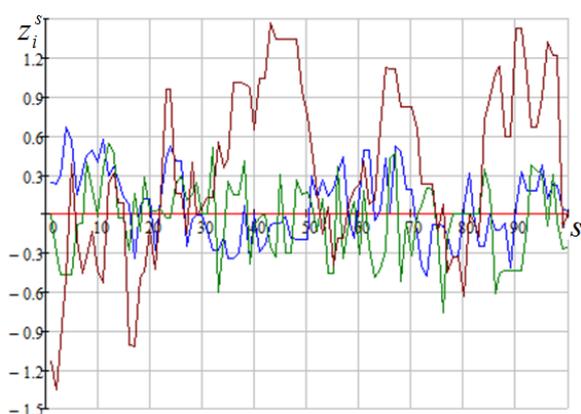
Таблица 2

Результаты фильтрации выбросов в статическом режиме

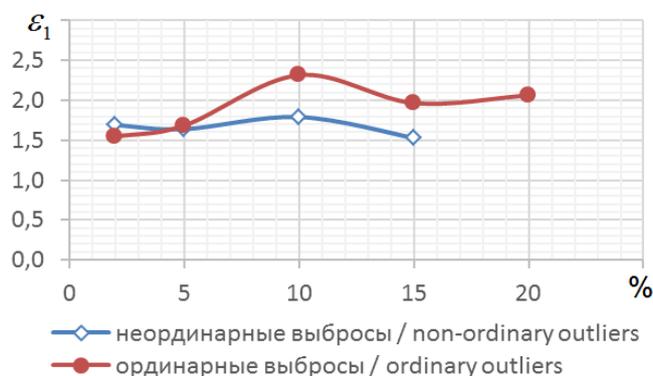
Table 2

Results of outlier filtration in the static mode

% выбросов	№ ряда	Неординарные выбросы			Ординарные выбросы		
		$\varepsilon_i$ – сумма квадратов отклонений (погрешность оценки)			$\varepsilon_i$ – сумма квадратов отклонений (погрешность оценки)		
		Без фильтрации	Выбросы отфильтрованы		Без фильтрации	Выбросы отфильтрованы	
		МНК	МНК	На основе прогнозов	МНК	МНК	На основе прогнозов
2	1	$2.8 \cdot 10^5$	5.485	1.69	$1.923 \cdot 10^5$	5.365	1.545
	2	$3.033 \cdot 10^5$	5.645	1.81	$2.588 \cdot 10^5$	5.529	1.859
	3	$2.502 \cdot 10^6$	6.702	2.889	$1.663 \cdot 10^6$	5.745	1.907
	4	$2.8 \cdot 10^5$	5.485	1.69	$1.986 \cdot 10^5$	5.582	1.572
5	1	$1.447 \cdot 10^6$	5.008	1.639	$1.224 \cdot 10^6$	5.715	1.684
	2	$5.641 \cdot 10^6$	5.488	1.994	$3.187 \cdot 10^6$	5.63	1.824
	3	$3.034 \cdot 10^6$	5.784	2.337	$1.729 \cdot 10^6$	6.204	2.252
	4	$7.816 \cdot 10^6$	15.495	12.874	$8.55 \cdot 10^6$	5.737	2.287
10	1	$1.393 \cdot 10^6$	5.616	1.792	$1.583 \cdot 10^6$	5.914	2.316
	2	$4.359 \cdot 10^6$	5.832	2.212	$5.227 \cdot 10^6$	5.804	2.523
	3	$6.896 \cdot 10^6$	7.567	3.817	$4.003 \cdot 10^6$	7.054	3.931
	4	$4.072 \cdot 10^6$	7.142	3.385	$8.174 \cdot 10^6$	10.188	7.062
15	1	$2.563 \cdot 10^6$	4.868	1.527	$2.477 \cdot 10^6$	5.696	1.966
	2	$7.085 \cdot 10^6$	5.968	2.5	$8.433 \cdot 10^6$	6.016	2.139
	3	$9.922 \cdot 10^6$	6.113	3.038	$1.308 \cdot 10^7$	9.541	4.985
	4	$8.402 \cdot 10^6$	10.926	6.662	$5.74 \cdot 10^6$	7.088	4.783
20	1	$3.141 \cdot 10^6$	$5.247 \cdot 10^6$	$2.205 \cdot 10^6$	$3.138 \cdot 10^6$	5.734	2.062
	2	$1.167 \cdot 10^7$	$2.342 \cdot 10^7$	$9.225 \cdot 10^6$	$1.625 \cdot 10^7$	6.784	2.981
	3	$3.14 \cdot 10^6$	$1.786 \cdot 10^7$	$2.205 \cdot 10^6$	$9.515 \cdot 10^6$	7.419	4.517
	4	$1.801 \cdot 10^7$	$2.646 \cdot 10^7$	$2.445 \cdot 10^7$	$8.76 \cdot 10^6$	14.092	10.953



a



b

Рис. 2. Результаты фильтрации в статическом режиме: а – ряды измерений; б – зависимость погрешности оценивания от процента выбросов в рядах измерений  
Fig. 2. Filtration results in the static mode: a – series of measurements; b – dependence of the estimation error on the outlier percentage in the series of measurements



теряет фильтрующую способность при 20% неординарных выбросов, соответствующее значение на графике не выводилось.

Приведенные результаты показывают, что эффективность предложенного алгоритма фильтрации в статическом режиме зависит от процента выбросов: алгоритм фильтрует ординарные и неординарные выбросы, не превышающие 18%. Погрешность оценки (сумма квадратов отклонений) частоты опорного генератора при отсутствии выбросов равна 1.601, а при наличии выбросов в диапазоне до 18% соответствующая величина не превышает 2. Однако алгоритм теряет фильтрующую способность, если аномальные значения составляют 20 и более процентов от длины ряда. На практике данное ограничение несущественно, поскольку возможность одновременного возникновения выбросов в таком количестве маловероятна.

Отметим, что вычисление МНК-оценок для рядов, содержащих выбросы, практически не имеет смысла, а МНК-оценки, вычисленные по рядам измерений, полученным в результате работы предлагаемого алгоритма фильтрации аномальных измерений, имеют погрешность (оцениваемую суммой квадратов отклонений полученных оценок от «истинных» значений) выше, чем у соответствующих оценок, полученных в результате работы алгоритма с применением прогнозирующих моделей.

После отбраковки «выбросов», идентификации ступенчатых функций, описывающих скачки частоты, идентификации полиномиальных трендов и их удаления из эмпирических рядов для рядов  $y_i^s$ , являющихся реализациями стационарных составляющих процессов изменения частоты водородных стандартов, могут быть построены соответствующие математические модели, используемые затем при вычислении оценок частоты опорного генератора в процессе динамической обработки.

### Фильтрация выбросов в динамическом режиме

При динамической обработке данных оценка частоты опорного генератора вычисляется по формуле [2]:

$$\hat{y}_1^s = \sum_{i=1}^n g_i I_i (z_i^s + \hat{y}_i^s(1)),$$

где  $g_i = \frac{1}{\sigma_i^2} / \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2}$  – вес  $i$ -го измерения,  $\sigma_i^2$  – остаточная дисперсия, вычисляемая при подгонке параметров  $i$ -й прогнозирующей модели;  $\hat{y}_i^s(1)$  – прогноз частоты  $i$ -го генератора, вычисленный на предыдущем такте, полученный на основе математических моделей, построенных на этапе статической обработки данных;  $I_i$  – индикатор для генератора с номером  $i$ .

Задача фильтрации выбросов решена на основе применения процедуры проверки гипотез. При этом сравнивается текущее значение оценки частоты  $i$ -го генератора с максимально допустимым отклонением частоты от прогноза, вычисленного на предыдущем такте. То есть проверяется гипотеза: не выходит ли оценка частоты за пределы доверительных интервалов. Доверительные интервалы определяются оценкой дисперсии, полученной на стадии статической обработки данных. Доверительный интервал вычисляется по формуле:

$$\Delta_i = \hat{\sigma}_{i \setminus j} \dots \hat{\sigma}_i^2,$$

где  $\hat{\sigma}$  – оценка среднеквадратического отклонения ряда  $y_i$ ,  $K$  – коэффициент, определяющий уровень значимости, находится на этапе статической обработки данных.

Таким образом, возможность отбраковки выбросов при обработке данных в темпе поступления обусловлена тем, что на предыдущем такте вычисляется не только прогноз каждого



из генераторов на один такт вперед, но и его доверительные интервалы. Если в результате  $i$ -го измерения имели место выброс, оценка частоты, вычисленная на такте  $s$ , выйдет за границы доверительного интервала. Следовательно, результаты этого измерения не должны учитываться при вычислении оценки опорного генератора. Вначале при обработке данных на такте  $s$  все индикаторы  $I_i$  устанавливаются в единицу, затем, при обнаружении выброса в значениях частоты у какого-либо из генераторов, соответствующий индикатор устанавливается в ноль. Если аномальные измерения имеют место в нескольких результатах  $z_i^s$ , в ноль сбрасывается тот индикатор, выход оценки которого за доверительные границы максимален. При обнаружении выброса полученная оценка частоты заменяется ее прогнозом. После этого вновь находится оценка опорного (исключая отброшенное измерение и прогноз соответствующего генератора) и оставшихся генераторов. Процедура повторяется до тех пор, пока не будут отброшены все результаты измерений, содержащие выбросы. Если из обработки будут исключены все измерения, то это будет идентифицироваться как выброс частоты в опорном генераторе, в этом случае оценки всех генераторов будут заменены их прогнозами.

Все вышеописанное может быть представлено в виде следующего алгоритма:

1. На текущем такте обработки устанавливаются индикаторы для всех генераторов в единицу.
2. Вычисляются оценки частот всех генераторов на текущем такте обработки с учетом значений индикаторов.
3. Вычисляются доверительные интервалы для значений частот генераторов, включенных в обработку на данном такте.
4. Проверяются гипотезы о наличии выбросов. Если гипотеза о наличии выброса хотя бы в одном измерении не отклоняется, определяется номер генератора, частота которого имеет максимальный выход за доверительный интервал.
5. Заменяется прогнозом оценка генератора, содержащего максимальный выброс, и устанавливается соответствующий индикатор в ноль.
6. Переход к шагу 2.

### Экспериментальная проверка алгоритма фильтрации в динамическом режиме

Экспериментальная проверка алгоритма при наличии выбросов проводилась следующим образом:

1. Проводилась динамическая обработка временных рядов, полученных в ходе статической обработки данных и описанных в табл. 1. В ходе имитации обработки данных в темпе поступления для сравнения эффективности алгоритмов, опирающихся на использование прогнозирующих моделей, по сравнению с алгоритмами метода наименьших квадратов использовалась сумма квадратов отклонений рядов оценок от «истинных» рядов (т.е. сгенерированных рядов). Результирующие значения сумм квадратов отклонений полностью совпадают с аналогичными значениями, полученными при обработке этих рядов в режиме накопления (5.421 и 1.601), что подтверждает корректность работы алгоритмов в динамическом режиме.

2. Аналогично моделированию погрешностей в статическом режиме в ряды измерений  $z$  вносились аддитивные выбросы, момент возникновения и амплитуда которых определялись случайным образом.

3. Процент выбросов задавался исследователем и изменялся в диапазоне от 5 до 30 процентов, исследовалось влияние ординарных и неординарных выбросов. Сводные результаты имитационных экспериментов приведены в табл. 3.

Графики зависимости от процента ординарных и неординарных выбросов суммы квадратов отклонений рядов оценок, полученных с учетом прогнозов и с использованием предложенного алгоритма фильтрации, от «истинных» рядов для опорного генератора приведены на рис. 3.



Таблица 3

Результаты фильтрации выбросов в динамическом режиме

Table 3

Results of outlier filtration in the dynamic mode

% выбросов	№ ряда	Неординарные выбросы		Ординарные выбросы	
		$\varepsilon_i$ – сумма квадратов отклонений (погрешность оценки)		$\varepsilon_i$ – сумма квадратов отклонений (погрешность оценки)	
		МНК оценки без фильтрации	Выбросы отфильтрованы, оценки на основе прогнозов	МНК оценки без фильтрации	Выбросы отфильтрованы, оценки на основе прогнозов
5	1	$3.783 \cdot 10^3$	2.289	$1.164 \cdot 10^3$	2.219
	2	$7.053 \cdot 10^3$	2.348	$4.313 \cdot 10^3$	2.642
	3	$2.196 \cdot 10^4$	2.616	$2.929 \cdot 10^3$	2.381
	4	$1.237 \cdot 10^4$	2.61	$5.477 \cdot 10^3$	6.79
10	1	$5.301 \cdot 10^3$	2.204	$7.185 \cdot 10^3$	2.42
	2	$3.604 \cdot 10^4$	3.011	$3.965 \cdot 10^4$	3.174
	3	$1.839 \cdot 10^4$	2.252	$1.745 \cdot 10^4$	2.649
	4	$8.762 \cdot 10^3$	9.724	$2.144 \cdot 10^4$	7.388
15	1	$5.282 \cdot 10^3$	2.302	$5.258 \cdot 10^3$	2.162
	2	$3.895 \cdot 10^4$	2.787	$1.595 \cdot 10^4$	2.393
	3	$2.48 \cdot 10^4$	2.497	$1.306 \cdot 10^4$	2.659
	4	$2.249 \cdot 10^4$	15.259	$2.889 \cdot 10^4$	14.127
20	1	$1.234 \cdot 10^4$	2.216	$6.429 \cdot 10^3$	2.485
	2	$4.468 \cdot 10^4$	2.347	$3.865 \cdot 10^4$	2.599
	3	$2.439 \cdot 10^4$	2.959	$1.323 \cdot 10^4$	2.789
	4	$4.265 \cdot 10^4$	16.631	$1.982 \cdot 10^4$	8.343
30	1	$1.368 \cdot 10^4$	2.275	$9.716 \cdot 10^3$	2.323
	2	$6.449 \cdot 10^4$	2.759	$4.042 \cdot 10^4$	2.789
	3	$5.243 \cdot 10^4$	3.84	$4.26 \cdot 10^4$	3.121
	4	$7.736 \cdot 10^4$	22.713	$2.368 \cdot 10^4$	6.031

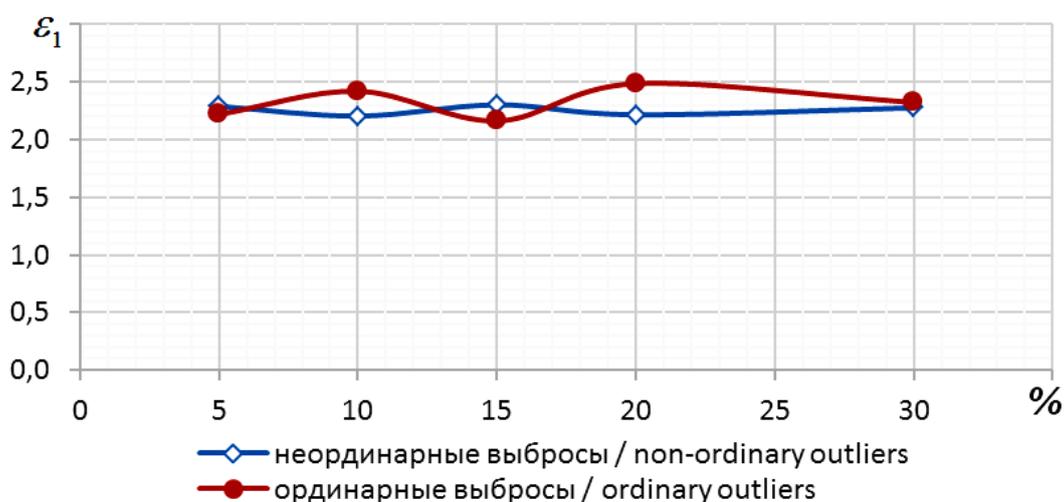


Рис. 3. Зависимость погрешности оценивания частоты опорного генератора от процента выбросов в рядах измерений в динамическом режиме

Fig. 3. Dependence of the estimation error of reference generator frequency on the outlier percentage in the series of measurements in the dynamic mode



Полученные результаты подтверждают работоспособность предложенного алгоритма фильтрации выбросов. Приведенные результаты показывают, что эффективность алгоритма фильтрации практически не зависит от процента выбросов, а погрешность оценки (сумма квадратов отклонений) частоты опорного генератора при отсутствии выбросов равна 1.601, а при наличии выбросов в исследуемом диапазоне соответствующая величина не превышает 2.5.

### Заключение

Рассмотренные в статье методы фильтрации аномальных измерений позволяют устранить влияние выбросов на результаты получаемых оценок значений частот водородных стандартов, входящих в состав группового эталона времени и частоты.

Для фильтрации выбросов в статическом режиме предложено использовать  $\alpha$ -усеченные оценки с неизвестным процентом аномальных измерений. Традиционная процедура отбраковки выбросов дополнена введением на каждом такте процедуры проверки гипотезы: значимо ли уменьшилась дисперсия оставшейся части выборки после удаления очередной пары предполагаемых выбросов. Процесс прекращается, если выборочная дисперсия практически не меняется (все выбросы отфильтрованы).

При динамической обработке данных выбросы отбраковываются при выходе получаемых на данном такте оценок частот за доверительные интервалы, вычисляемые на основе прогнозирующих моделей процессов изменения частоты, построенных на этапе статической обработки данных.

Предложенные в работе алгоритмы фильтрации в статическом и динамическом режимах апробированы методом статистического моделирования и, частично, на реальных данных, полученных в процессе эксплуатации государственного вторичного эталона ВЭТ 1-5. В целом полученные результаты подтверждают работоспособность предложенных алгоритмов.

Полученные результаты создают возможность построения математических моделей процессов изменения частоты водородных стандартов, входящих в состав группового эталона, что позволит повысить точность оценивания вектора состояния эталона времени и частоты.

Предлагаемые методы фильтрации являются необходимым этапом при разработке формализованной методики оценивания состояния группового эталона времени и частоты в статическом и динамическом режимах, основанной на применении прогнозирующих моделей.

### Библиографический список

1. Гамм А.З. Статистические методы оценивания состояния электро-энергетических систем. М.: Наука, 1976. 220 с.
2. Хрусталёв Ю.П. Статическая и динамическая обработка данных, получаемых в процессе ведения эталонов времени частоты // Измерительная техника. 2004. № 6. С. 20–23.
3. Острем К.Ю. Введение в стохастическую теорию управления / пер. с англ. М.: Мир, 1973. 321 с.
4. Charu C. Aggarwal. Outlier Analysis. 2nd Edition. NY: Springer International Publishing AG, 2017. 481 p.
5. Хогг Р.В. Введение в помехоустойчивое оценивание / В кн.: Устойчивые статистические методы оценки данных. М.: Машиностроение, 1984. С. 86–105.
6. Патюков В.Г. Основы частотно-временных измерений. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014. 166 с.
7. Додонов В.А. Применение методов помехоустойчивого оценивания в задачах анализа измерительной информации // Реєстрація, зберігання і обробка даних. 2008. Т. 10. № 2. С. 101–120.
8. Khrustalev Yu.P., Serysheva I.A. Increasing of robustness of estimators of the state of time and frequency standards // Measurement Techniques. 2014. Vol. 57. No. 5. P. 519–525.
9. Горяинов В.Б., Горяинова Е.Р. Влияние аномальных наблюдений на оценку наименьших квадратов параметра авторегрессионного уравнения со случайным коэффициентом // Вестник МГТУ им. Баумана. Серия: Естественные науки. 2016. № 2. С. 16–24. DOI: 10.18698/1812-3368-2016-2-16-24
10. Марчук В.И., Токарева С.В. Способы обнаружения аномальных значений при анализе нестационарных случайных процессов. Шахты: ЮРГУЭС, 2009. 210 с.
11. Попукайло В.С. Обнаружение аномальных измерений при обработке данных малого объема // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2016. № 4–5. С. 42–46. DOI: 10.15222/ТКЕА2016.4-5.42
12. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: ФИЗМАТЛИТ,



2006. 816 с.

13. Han J., Kamber M., Pei J. *Data Mining Concepts and Techniques*. Third Edition. Waltham, MA, USA : Morgan Kaufmann Publishers is an imprint of Elsevier. 2012. 703 p.
14. Aggarwal C.C., Gao J., Gupta M., Han J. *Outlier detection for temporal data*. New York: Morgan & Claypool Publishers. 2014. 131 p.
15. Фомин А.Ф., Новоселов О.Н., Плющев А.В. *Отбраковка аномальных результатов измерений*. М.: Энергоатомиздат, 1985. 200 с.
16. Lemeshko B.Yu., Lemeshko S.B. Extending the Application of Grubbs-Type Tests in Rejecting Anomalous Measurements // *Measurement Techniques*. 2005. Vol. 48. No. 6. P. 536–547.
17. Maronna R.A., Martin D., Yohai V. *Robust Statistics: Theory and Methods*. Chichester: Wiley. 2006. 403 p.

### References

1. Gamm A.Z. *Statisticheskie metody ocenivaniya sostoyaniya elektro-energeticheskikh system* [Statistical assessment methods of electrical energy system states]. Moscow: Nauka Publ., 1976, 220 p.
2. Hrustal'ov Yu.P. Static and dynamic processing of data obtained while maintaining time and frequency standards. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement Techniques], 2004, no. 6, pp. 20–23.
3. Ostrem K.Yu. *Vvedenie v stokhasticheskuyu teoriyu upravleniya / per. s angl.* [Introduction to stochastic control theory]. M.: Mir, 1973. 321 p.
4. Charu C. Aggarwal. *Outlier Analysis*. 2nd Edition. NY: Springer International Publishing AG, 2017, 481 p.
5. Hogg R.V. *Vvedenie v pomekhoustojchivoe ocenivanie* [Introduction to noise-resistant estimation]. *Ustojchivye statisticheskie metody ocenki dannykh* [Sustainable statistical methods for data evaluation]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1984, pp. 86–105.
6. Patyukov V.G. *Osnovy chastotno-vremennykh izmerenij* [Basics of time-frequency measurements]. Krasnoyarsk: Siberian federal University Publ., 2014, 166 p.
7. Dodonov V.A. Application of methods of noise-free estimation in the problems of measurement information analysis. *Reestraciya, zberigannya i obrobka danih* [Registration, storage and processing of data], 2008, vol. 10, no. 2, pp. 101–120.
8. Khrustalev Yu.P., Serysheva I.A. Increasing of robustness of estimators of the state of time and frequency standards // *Measurement Techniques*, 2014, vol. 57, no. 5, pp. 519–525.
9. Goryainov V.B., Goryainova E.R. The influence of anomalous observations on the least squares estimate of the parameter of the autoregressive equation with a random coefficient. *Vestnik MGTU im. Baumana. Seriya: Estestvennye nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences], 2016, no. 2, pp. 16–24. DOI: 10.18698/1812-3368-2016-2-16-24
10. Marchuk V.I., Tokareva S.V. *Sposoby obnaruzheniya anomal'nykh znachenij pri analize nestacionarnykh sluchajnykh processov* [Detection methods of anomalous values in the analysis of nonstationary random processes]. Shahty: YuRGUES Publ., 2009, 210 p.
11. Popukajlo V.S. Detection of outliers in processing of small size data. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature* [Technology and design in electronic equipment], 2016, no. 4–5, pp. 42–46. DOI: 10.15222/TKEA2016.4-5.42
12. Kobzar' A.I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov* [Applied mathematical statistics. For engineers and scientists]. Moscow: FIZMATLIT Publ., 2006, 816 p.
13. Han J., Kamber M., Pei J. *Data Mining Concepts and Techniques*. Third Edition. Waltham, MA, USA: Morgan Kaufmann Publishers is an imprint of Elsevier, 2012, 703 p.
14. Aggarwal C.C., Gao J., Gupta M., Han J. *Outlier detection for temporal data*. New York: Morgan & Claypool Publishers, 2014, 131 p.
15. Fomin A.F., Novoselov O.N., Plyushchev A.V. *Otbrakovka anomal'nykh rezul'tatov izmerenij* [Rejection of anomalous measurements]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1985, 200 p.
16. Lemeshko B.Yu., Lemeshko S.B. Extending the Application of Grubbs-Type Tests in Rejecting Anomalous Measurements. *Measurement Techniques*, 2005, vol. 48, no. 6, pp. 536–547.
17. Maronna R.A., Martin D., Yohai V. *Robust Statistics: Theory and Methods*. Chichester: Wiley, 2006, 403 p.

### Критерии авторства

Серышева И.А. провела исследование, подготовила рукопись и несет ответственность за плагиат.

### Authorship criteria

Serysheva I.A. conducted a study, prepared the manuscript for publication and is responsible for plagiarism.

### Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

### Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.



Оригинальная статья / Original article

УДК 519.7

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-10-78-91>

## ОБОСНОВАНИЕ УСТАНОВЛЕНИЯ ОТНОШЕНИЯ СТРОГОГО ПОРЯДКА В ЗАДАЧЕ РАНЖИРОВАНИЯ / ВЫБОРА АЛЬТЕРНАТИВ СТРОИТЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛА

© В.А. Харитонов<sup>1</sup>, Д.Н. Кривоги́на<sup>2</sup>

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
614000, Российская Федерация, г. Пермь, Комсомольский просп., 29.

**РЕЗЮМЕ.** Понятия «ранжирование» и «выбор» тесно связаны между собой. Процесс выбора является завершающей фазой процедуры ранжирования, итогом которой является предпочтительное подмножество альтернатив. Процедура ранжирования представляет собой процесс установления отношения строгого порядка между заданным числом альтернатив. **ЦЕЛЬЮ** работы является экспериментальное подтверждение гипотезы о том, что преодоление проблемы обеспечения отношения строгого порядка для сложных задач ранжирования/выбора возможно на основе механизации (компьютеризации) ментальной деятельности субъекта выбора посредством декомпозиции проявления исходной интуиции на множестве представленных альтернатив на совокупность частных, более простых, задач. **МЕТОДЫ** для достижения цели использованы математические и статистические. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Процедура установления отношения строгого порядка представлена по двум аспектам в два этапа. В первом случае осуществляется поэтапное увеличение числа альтернатив при фиксированном числе существенных характеристик. Во втором – пошаговое увеличение числа существенных характеристик при фиксированном числе альтернатив. К процессу установления отношения строгого порядка привлечены респонденты, имеющие различные стратегии выбора, которым предложено первоначально осуществить процедуру ранжирования альтернатив интуитивно, а затем при помощи построения модели предпочтений в программном продукте «Джобс-Декон». **ВЫВОДЫ.** На конкретных примерах установления отношения строгого порядка между альтернативами, полученных интуитивно и при помощи применения усредненной модели предпочтений, пришли к выводу, что с ростом числа альтернатив человеку становится сложно установить строгий порядок между ними. Программный продукт «Джобс-Декон» позволяет снизить уровень неопределенности между отдельными альтернативами и повысить процент установления отношения строгого порядка.

**Ключевые слова:** ранжирование, выбор, строгий порядок, строительные материалы, бетон, альтернативы строительных материалов, характеристики строительных материалов.

**Информация о статье.** Дата поступления 16 июля 2018 г.; дата принятия к печати 28 сентября 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 октября 2018 г.

**Формат цитирования.** Харитонов В.А., Кривоги́на Д.Н. Обоснование установления отношения строгого порядка в задаче ранжирования/выбора альтернатив строительного материала // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 10. С. 78–91. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-78-91

## RATIONALE FOR ESTABLISHING STRICT ORDER RELATIONS IN THE PROBLEM OF RANKING / SELECTING ALTERNATIVES OF CONSTRUCTION MATERIAL

V.A. Kharitonov<sup>1</sup>, D.N. Krivogina<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Perm National Research Polytechnic University,  
29, Komsomolsky pr., Perm, 614000, Russian Federation

**ABSTRACT.** The concept of ranking and choice are closely related. The selection process is the final phase of the ranking procedure, the result of which is the preferred subset of alternatives. The ranking procedure is the process of establishing

<sup>1</sup>Харитонов Валерий Алексеевич, доктор технических наук, профессор кафедры строительного инжиниринга и материаловедения, e-mail: [cems@pstu.ru](mailto:cems@pstu.ru)

Valery A. Kharitonov, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Construction Engineering and Materials Science, e-mail: [cems@pstu.ru](mailto:cems@pstu.ru)

<sup>2</sup>Кривоги́на Дарья Николаевна, аспирант, e-mail: [krivogina@cems.pstu.ru](mailto:krivogina@cems.pstu.ru)  
Daria N. Krivogina, Postgraduate student, e-mail: [krivogina@cems.pstu.ru](mailto:krivogina@cems.pstu.ru)



a strict order relation between a given number of alternatives. The **PURPOSE** of work is the experimental confirmation of the hypothesis advancing the idea that the problem of providing a strict order relation for complex ranking/selection problems can be overcome on the basis of mechanization (computerization) of the mental activity of the subject of choice via decomposition of original intuition manifestations on the set of presented alternatives into a set of particular, simpler problems. **METHODS.** The set purpose is achieved through the use of mathematical and statistical methods. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The procedure for establishing a strict order relations is presented by two aspects in two stages. In the first case, the number of alternatives is increased stage-by-stage under the fixed number of essential characteristics. In the second case, there is a step-by-step increase in the number of essential characteristics under the fixed number of alternatives. The process of establishing a strict order relationship involved the respondents with different choice strategies, who were offered to initiate the alternative ranking procedure first intuitively, and then by constructing a model of preferences in Decon Jobs software product. **CONCLUSIONS.** The specific examples of establishing the strict order relations between the alternatives obtained intuitively and using the averaged preference model allowed to conclude that the growth in the number of alternatives complicates a person to establish a strict order between them. The software product Decon Jobs allows to reduce the level of uncertainty between individual alternatives and to increase the percentage of establishing a strict order relation.

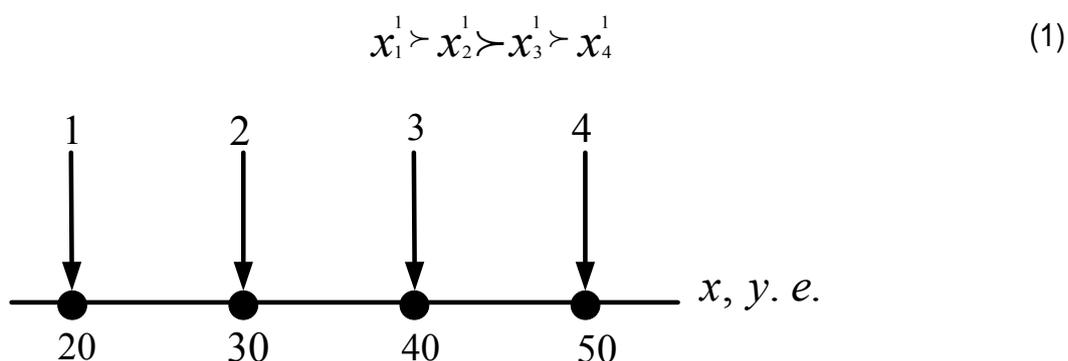
**Keywords:** ranking, choice, strict order, building materials, concrete, alternatives to building materials, characteristics of building materials

**Information about the article.** Received July 16, 2018; accepted for publication September 28, 2018; available online October 31, 2018.

**For citation.** Kharitonov V.A., Krivogina D.N. Rationale for establishing strict order relations in the problem of ranking / selecting alternatives of construction material. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 10, pp. 78–91. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-78-91. (In Russian)

## Введение

Любая деятельность человека, например, выбор технологического процесса производства строительных материалов (ТПП СМ) упирается в необходимость решения задач ранжирования/выбора. Понятия ранжирование/выбор тесно связаны между собой. В этом сложном составном понятии (ранжирование/выбор) процесс выбора является завершающей фазой, итогом которой является предпочтительное подмножество альтернатив. Однако постановка задачи выбора может быть осуществлена только после окончания процедуры ранжирования представляемого множества альтернатив (рис. 1) с установлением на нем строгого порядка (1).



**Рис. 1. Установление строгого порядка на множестве альтернатив (ранжирование)**  
**Fig. 1. Establishing a strict order on a set of alternatives (ranking)**

Отношение нестрогого порядка  $x_1^1 \succ x_2^1 = x_3^1 \succ x_4^1$  между альтернативами предполагает неразличимость субъектом выбора отдельных альтернатив  $x_2^1 = x_3^1$  друг от друга. При поста-

новке задачи выбора это тождество делает невозможным обоснованное решение задачи выбора между тождественными альтернативами  $x_2^1, x_3^1$ , и осознанный выбор заменяется волюнтаристическим назначением лучшего варианта альтернативы [1–5]. Отсюда можно сделать вывод о том, что нарушение отношения строгого порядка между альтернативами делает невозможным обоснование выбора, превращая его в игру случая (процедура выбора происходит случайным образом) или в объект манипулирования результатами выбора. Подобные нежелательные ситуации возникают, когда при решении данного класса задач используется интуиция человека в рамках ее природных возможностей (рис. 2 а), а сложность задачи ранжирования/выбора достаточно велика по показателям: мощности множества альтернатив и многофакторности каждого элемента из этого множества.

### Актуальность обеспечения отношения строгого порядка на заданном множестве альтернатив

Можно выдвинуть некоторую актуальную для данного класса задач гипотезу, подлежащую экспериментальному подтверждению, о том, что преодоление проблемы обеспечения отношения строгого порядка для сложных задач ранжирования/выбора возможно на основе механизации (компьютеризации) ментальной деятельности субъекта выбора [6–14] посредством декомпозиции проявления исходной интуиции на множестве представленных альтернатив на совокупность частных, более простых задач. В этом случае интуиция человека раскрывается в полной мере, снижая риск проявления отношения нестрогого порядка на множество альтернатив. Процесс механизации, таким образом, становится процессом моделирования поведения человека в задачах ранжирования/выбора, который целесообразно осуществлять на полном множестве представления альтернатив с целью получения эффекта искусственного интеллекта. Такое предложение реализуется субъективной постановкой обобщенной задачи выбора на виртуальном, достаточно широком множестве альтернатив [4]. Тогда полученный программный продукт становится полезным средством решения задач ранжирования/выбора на любом представляемом подмножестве альтернатив без непосредственного участия субъекта выбора практически при том же самом результате. Отстранение субъекта выбора от участия в выборе придает последнему свойство неманипулируемости (рис. 2 б), чрезвычайно важному для прикладных задач.

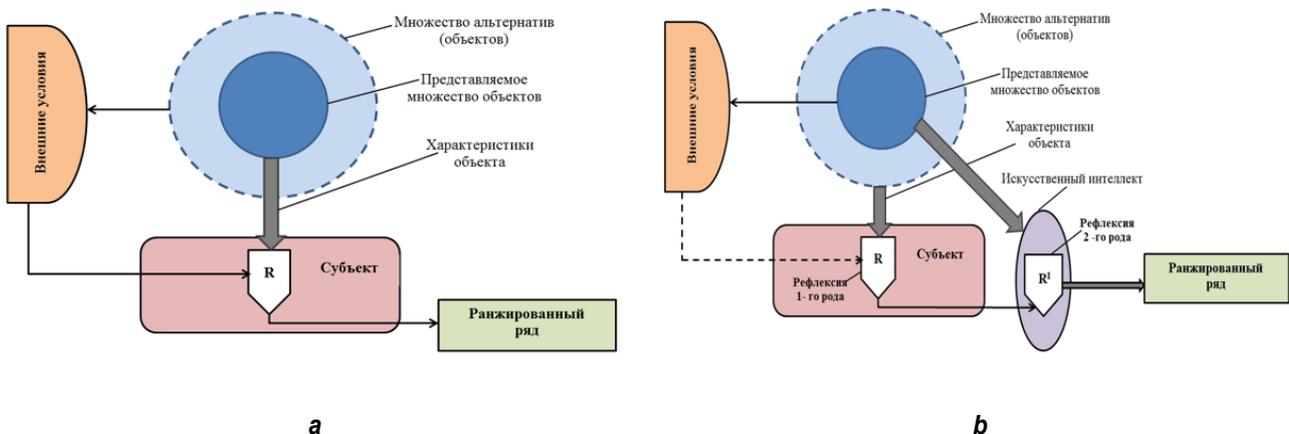


Рис. 2. Сложившаяся (а) и неманипулируемая (б) система решения задач выбора на представленном множестве альтернатив

Fig. 2. Existing (a) and non-manipulated (b) system of solving selection problems on the given set of alternatives



### Примеры процедур установления отношения строгого порядка между альтернативами строительного материала

Более подробно рассмотрим процедуру установления отношения строгого порядка по двум аспектам в два этапа:

- поэтапное увеличение числа альтернатив при фиксированном числе существенных характеристик;
- пошаговое увеличение числа существенных характеристик при фиксированном числе альтернатив.

К процессу установления отношения строгого порядка привлечем респондентов, предложив им первоначально осуществить процедуру ранжирования альтернатив интуитивно, а затем при помощи построения модели предпочтений в программном продукте «Джобс-Декон». В основе данного программного продукта лежит алгоритмическое обеспечение решения задач ранжирования и выбора, в котором помимо линейных сверток реализовано известное положение о целесообразности соединения «креативности и технологичности» [3].

Осуществим процедуру ранжирования строительного материала для изготовления плиты перекрытия. Респондентам, состоящим из 12 человек, предложено проранжировать множество имеющихся групп альтернатив, состоящих из 3, 5 и 8 единиц. Известно, что все качественные показатели альтернатив строительных материалов входят в область нормативных требований, которые предъявляются к характеристикам готовых изделий (прочность, плотность, морозостойкость и т.д.), предназначенных для строительства объекта недвижимости. И респондента интересует только цена приобретения. В табл. 1 представлено три множества альтернатив строительных материалов из бетона и соответствующая цена каждой альтернативе из представленных множеств.

**Таблица 1**  
**Множество альтернатив  $m$  строительных материалов из бетона**

**Table 1**

**Multiple alternatives  $m$  of building materials made of concrete**

Количество альтернатив $ m $	Вариант теста
	Альтернативы, $x_p$ тыс. руб.
$ m_1  = 3$	$x_{p_1} = 4800, x_{p_2} = 5400, x_{p_3} = 5700$
$ m_2  = 5$	$x_{p_1} = 4600, x_{p_2} = 5000, x_{p_3} = 5200, x_{p_4} = 5500, x_{p_5} = 5600$
$ m_3  = 8$	$x_{p_1} = 4600, x_{p_2} = 4800, x_{p_3} = 4900, x_{p_4} = 5100, x_{p_5} = 5300,$ $x_{p_6} = 5700, x_{p_7} = 5900, x_{p_8} = 6100$

По отношению к цене предполагаются различные стратегии выбора, присущие респондентам [2], в соответствии с которыми они осуществляют процедуру ранжирования. На первом шаге ранжирование осуществляется интуитивно.

**Экономичное поведение.** Респондентов интересует только цена «подешевле». Субъектом выбора интуитивно определяется пороговая цена за продукцию из полного множества представленных альтернатив и производится ранжирование материала по наименьшей цене.

Исходное множество  $m_1$  примет ранжированный вид для респондента с экономичным поведением для трех альтернатив:  $m_{1p.э} = \{x_{p_1} \succ x_{p_2} \succ x_{p_3}\}$ . Распространив данную методику на представленные множества альтернатив  $|m_2|$  и  $|m_3|$ , получим следующие отношения:



$$m_{2p.э} = \{x_{p_1} \succ x_{p_2} \succ x_{p_3} \succ x_{p_4} \succ x_{p_5}\}, m_{3p.э} = \{x_{p_1} \succ x_{p_2} \succ x_{p_3} \succ x_{p_4} \succ x_{p_5} \succ x_{p_6} \succ x_{p_7} \succ x_{p_8}\}.$$

**Доверительное поведение.** В данном случае респонденты полностью полагаются на цену, руководствуясь предположением: чем выше цена, тем выше качественные характеристики материала. Он производит ранжирование, выставляя на первое место самый дорогой материал, при этом подразумевая некий запас качественных показателей продукции:

$$m_{1p.д} = \{x_{p_3} \succ x_{p_2} \succ x_{p_1}\}, m_{2p.э} = \{x_{p_5} \succ x_{p_4} \succ x_{p_3} \succ x_{p_2} \succ x_{p_1}\},$$

$$m_{3p.э} = \{x_{p_8} \succ x_{p_7} \succ x_{p_6} \succ x_{p_5} \succ x_{p_4} \succ x_{p_3} \succ x_{p_2} \succ x_{p_1}\}.$$

**Рациональное поведение.** В данном случае респонденты придерживаются правила «золотой середины» в ценовой категории материала. По их мнению, материалы со средней ценой за единицу продукции являются наиболее оптимальными касательно отношения качества и цены. Для множества  $|m_1|$  золотой серединой является среднеарифметическое число

$$x_{p_{средняя}} = \frac{4600 + 5200 + 5700}{3} = 5300. \text{ Тогда исходное множество примет ранжированный вид, где}$$

наиболее предпочтительные варианты характеризуются близостью к «золотой середине»

$$m_{1p.p} = \{x_{p_2} \succ x_{p_3} \succ x_{p_1}\}.$$

Применимо к множеству альтернатив  $|m_2|$  получим среднее арифметическое число,

$$\text{равное } x_{p_{средняя}} = \frac{4800 + 5000 + 5200 + 5500 + 5600}{5} = 5220, \text{ а для множества } |m_3| -$$

$$x_{p_{средняя}} = \frac{4600 + 4800 + 4900 + 5100 + 5300 + 5700 + 5900 + 6100}{8} = 5300. \text{ Соответственно ранжи-}$$

рованные ряды данных множеств альтернатив примут вид:

$$m_{2p.p} = \{x_{p_3} \succ x_{p_2} \succ x_{p_4} \succ x_{p_5} \succ x_{p_1}\} \text{ и}$$

$$m_{3p.p} = \{x_{p_5} \succ x_{p_4} \succ x_{p_3} \succ x_{p_6} \succ x_{p_2} \succ x_{p_7} \succ x_{p_1} \succ x_{p_8}\}.$$

Далее, предложим респондентам воспользоваться программным продуктом «Джобс-Декон» и осуществить процедуру ранжирования альтернатив строительных материалов на основе построения модели предпочтений. Данные предпочтения базируются на построенных функциях приведения [7]. Функции приведения позволяют физические значения выбранной характеристики материала перевести в квазиметрическое пространство, в котором возможна процедура комплексного оценивания альтернатив.

Каждому из респондентов предложено построить свою, в соответствии с присущим ему типом поведения, функцию приведения.

В табл. 2 представлены основные квазиметрические значения параметров характеристик материала. В соответствии с методикой субъектно-ориентированного управления (СОУ) дискретные значения которых интерпретируются следующим образом: 1 – «неудовлетворительно», 2 – «удовлетворительно», 3 – «хорошо» и 4 – «отлично».

На основе построенных респондентами функций приведения строится средняя универсальная функция приведения ФП (рис. 3) [1].

После построения средней универсальной функции приведения сравниваются результаты ранжирования, полученные интуитивно каждым типом респондентов, с результатами, полученными на основе процедуры усреднения их модели предпочтений ФП (табл. 3).



Таблица 2

Основные квалиметрические значения параметров характеристик материала из бетона, необходимые для построения функций приведения

Table 2

Basic qualimetric values of concrete material characteristic parameters required for reduction function construction

Тип поведения	Квалиметрические значения параметров характеристик			
	1	2	3	4
Экономичный	6500	5790	5115	4500
Доверительный	4500	5208	5900	4500
Рациональный	4500	4868	5053	5321
	6500	6160	5957	5600
Промежуточный	4500	4863	5080	5375
	6500	6050	5800	5607

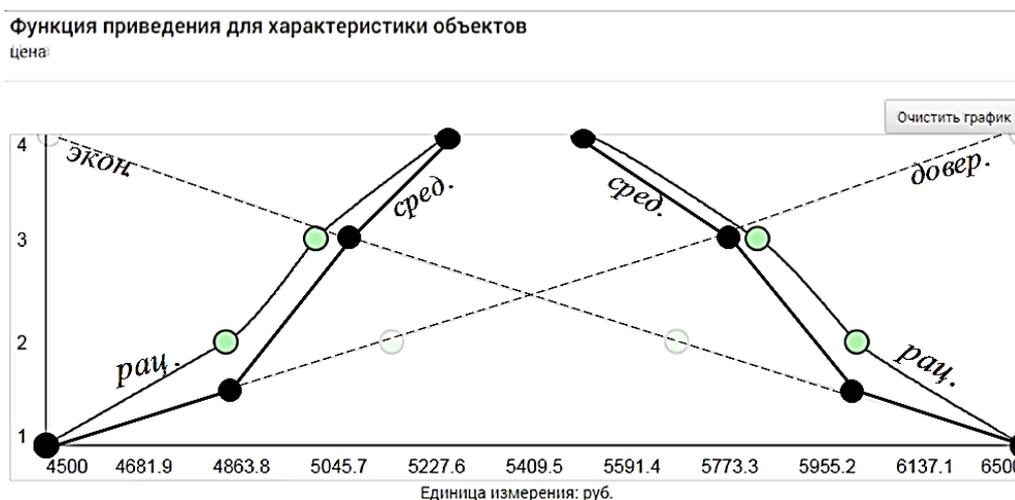


Рис. 3. Построение универсальной функции приведения для характеристики «цена»  
Fig. 3. Construction of the universal reduction function for the characteristic of price

Процедура сравнения осуществляется при помощи определения коэффициента ранжирования для каждого ранжированного ряда, построенного респондентами. Коэффициент ранжирования рассчитывается по формуле (2):

$$K_{эфф.} = \frac{|\{\hat{X}\}|_{стр.}}{|\{\bar{X}\}|}, \quad (2)$$

где  $|\{\hat{X}\}|_{стр.}$  – количество отношений строгого порядка,  $|\{\bar{X}\}|$  – общее количество отношений между альтернативами.

В результате сравнения результатов (рис. 4), полученных интуитивно, и при помощи применения усредненной модели предпочтений ФП, пришли к выводу, что с ростом числа альтернатив человеку становится сложно установить строгий порядок между ними (рис. 4). Программный продукт «Джобс-Декон» позволяет снизить уровень неопределенности между отдельными альтернативами и повысить процент установления отношения строгого порядка.



Таблица 3

Результаты ранжирования альтернатив респондентами  
и вычисление среднего показателя

Table 3

Results of respondents' alternative ranking and calculation of the average indicator

Тип поведения	Результаты ранжирования
Множество альтернатив $ m_1 $	
Экономичное поведение	$m_{1p.э} = \{x_{p_1} \succ x_{p_2} \succ x_{p_3}\}$
Доверительное поведение	$m_{1p.д} = \{x_{p_3} \succ x_{p_2} \succ x_{p_1}\}$
Рациональное поведение	$m_{1p.p} = \{x_{p_2} \succ x_{p_3} \succ x_{p_1}\}$
Средний показатель	$m_{1p.э} = \{x_{p_2} \succ x_{p_3} \succ x_{p_1}\}$
Множество альтернатив $ m_2 $	
Экономичное поведение	$m_{2p.э} = \{x_{p_1} \succ x_{p_2} \succ x_{p_3} \succ x_{p_4} \succ x_{p_5}\}$
Доверительное поведение	$m_{2p.д} = \{x_{p_5} \succ x_{p_4} \succ x_{p_3} \succ x_{p_2} \succ x_{p_1}\}$
Рациональное поведение	$m_{2p.p} = \{x_{p_3} \succ x_{p_2} \succ x_{p_4} \succ x_{p_5} \succ x_{p_1}\}$
Средний показатель	$m_{2p.э} = \{x_{p_3} \succ x_{p_2} \succ x_{p_5} \succ x_{p_1} \succ x_{p_4}\}$
Множество альтернатив $ m_3 $	
Экономичное поведение	$m_{3p.э} = \{x_{p_1} \succ x_{p_2} \succ x_{p_3} \succ x_{p_4} \succ x_{p_5} \succ x_{p_6} \succ x_{p_7} \succ x_{p_8}\}$
Доверительное поведение	$m_{3p.д} = \{x_{p_8} \succ x_{p_7} \succ x_{p_6} \succ x_{p_5} \succ x_{p_4} \succ x_{p_3} \succ x_{p_2} \succ x_{p_1}\}$
Рациональное поведение	$m_{3p.p} = \{x_{p_5} \succ x_{p_4} \succ x_{p_3} = x_{p_6} \succ x_{p_2} \succ x_{p_7} \succ x_{p_1} \succ x_{p_8}\}$
Средний показатель	$m_{3p.э} = \{x_{p_7} \succ x_{p_4} \succ x_{p_6} \succ x_{p_2} \succ x_{p_1} \succ x_{p_5} \succ x_{p_8} \succ x_{p_3}\}$

Теперь, на том же примере выбора материала для изготовления плиты перекрытия, рассмотрим процедуру ранжирования фиксированного числа альтернатив строительного материала при пошаговом увеличении числа их существенных характеристик [8, 9, 12]. Основные характеристики строительного материала из бетона представлены прочностью при сжатии (МПа), плотностью (кг\*с/см<sup>3</sup>), морозостойкостью (цикл), водонепроницаемостью (коэф.) и ценой (руб.) [10–14].

Респонденту предложим осуществить процедуру установления строгого порядка на пяти альтернативах, характеристики материала которых представлены в табл. 4.

На первом шаге респондент, аналогично предыдущему эксперименту, ранжирует характеристики альтернатив строительных материалов интуитивно, а затем данная процедура проводится при помощи программного продукта «Джобс-Декон». Эксперимент проводится несколько раз, при этом каждый раз увеличивается число значимых характеристик материала, а число альтернатив остается неизменным. Первоначально респондент осуществляет ранжирование альтернатив по двум, затем трем, четырем и, наконец, пяти известным характеристикам

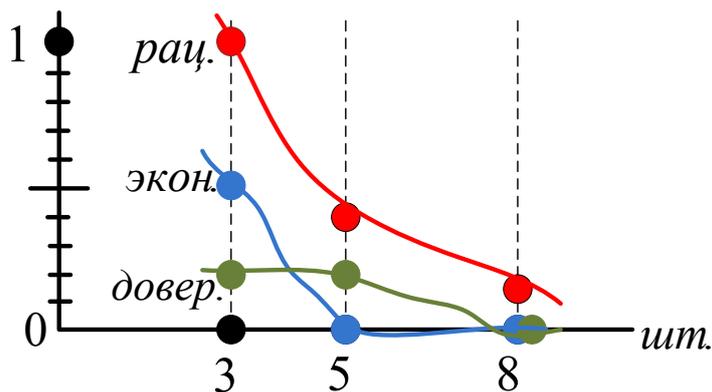


Рис. 4. Сравнение результатов ранжирования трех, пяти и восьми альтернатив интуитивным способом и при помощи программного продукта «Джобс-Декон»  
Fig. 4. Comparison of ranking results of three, five and eight alternatives by the intuitive method and by Decon Jobs software product

Таблица 4  
Характеристики альтернатив строительных материалов из бетона

Table 4

Characteristics of alternatives for concrete building materials

Альтернативы	Прочность при сжатии, МПа	Плотность, кг*с/см3	Морозостойкость, цикл	Водонепроницаемость, коэфф.	Цена, руб.
1	23	2241	202	4	4600
2	25	2315	175	6	5000
3	27	2363	178	7	5200
4	29	2294	222	5	5500
5	30	2250	225	7	5700

строительного материала, интуитивно определяя порядковый номер каждой альтернативы в ранжированном ряду. Затем процедура ранжирования проводится в программной среде «Джобс-Декон», респондентами поочередно выстраиваются функции приведения для всех востребованных характеристик материала, определяются взвешенные коэффициенты для данных характеристик и находятся комплексные оценки альтернатив, в соответствии с которыми определяются порядковые номера альтернатив в ранжированном ряду.

Более подробно рассмотрим процесс установления порядкового номера при ранжировании пяти альтернатив по двум характеристикам (табл. 5) при помощи механизма комплексного оценивания «Джобс-Декон».

Первоначально респондент на основе своих предпочтений строит функции приведения для заданных характеристик (рис. 5), выражая свои предпочтения относительно качественных характеристик строительного материала.



Таблица 5

Ранжирование альтернатив по двум характеристикам интуитивным способом и при помощи механизма комплексного оценивания «Джобс-Декон»

Table 5

Ranking of alternatives for two characteristics by the intuitive method and by Decon Jobs integrated estimation tool

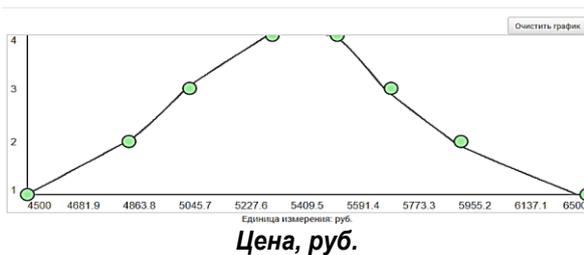
Множество альтернатив, $m$	Цена, руб.	Прочность при сжатии, МПа	Порядковый № в интуитивном ранжированном ряду	Порядковый № в ранжированном ряду по «Джобс-Декон»
1	4600	23	V	V
2	5000	25	IV	IV
3	5200	27	II	III
4	5500	29	I	I
5	5700	30	III	II

$$m_{инт} = \{4 > 3 > 5 > 2 > 1\}$$

$$m_{Джс} = \{4 > 5 > 3 > 2 > 1\}$$

$$K_{эфф.} = \frac{2}{5}$$

Функция приведения для характеристики объектов  
Цена



Функция приведения для характеристики объектов  
прочность

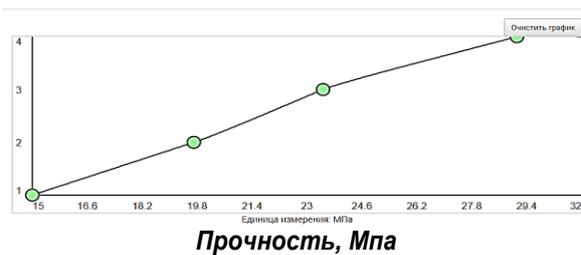


Рис. 5. Построение функций приведения к характеристикам материала: цена и прочность  
Fig. 5. Construction of functions reducing to material characteristics: price and durability

Затем осуществляет процедуру нахождения взвешенных коэффициентов, предварительно определив наиболее значимую характеристику из представленных двух (рис. 6).

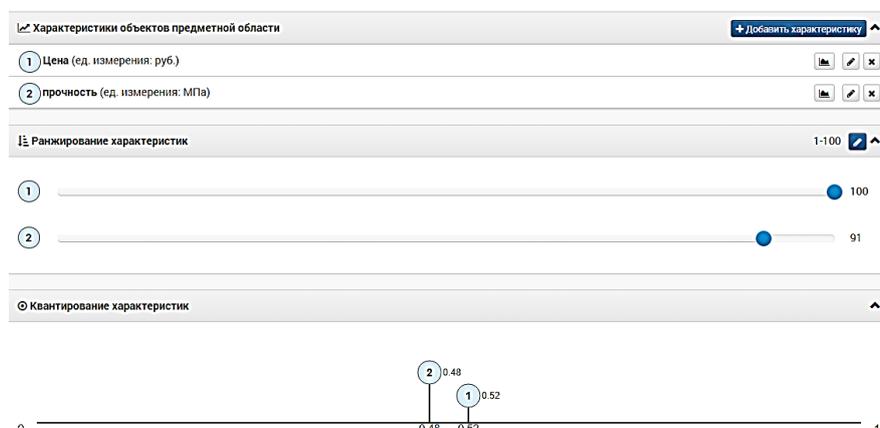


Рис. 6. Определение взвешенных коэффициентов характеристик строительного материала  
Fig. 6. Determination of weighted coefficients of building material characteristics



Затем в программный продукт заносятся физические показатели характеристик материала альтернатив и определяются их комплексные оценки. По данным комплексным оценкам осуществляется процедура ранжирования (рис. 7).

Аналогично проранжируем альтернативы по трем (табл. 6), четырем (табл. 7) и пяти (табл. 8) характеристикам строительного материала.

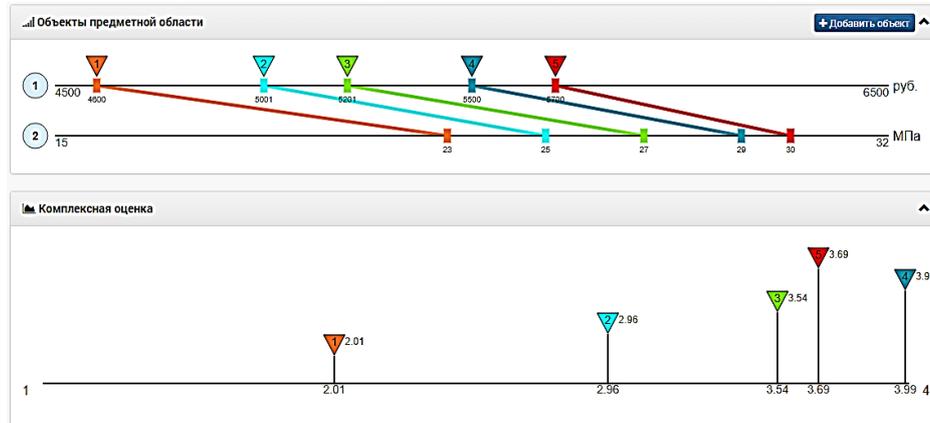


Рис. 7. Процедура определения комплексных оценок альтернатив строительных материалов  
Fig. 7. Procedure for determining comprehensive estimates of building material alternatives

Таблица 6

Ранжирование альтернатив по трем характеристикам интуитивным способом и при помощи механизма комплексного оценивания «Джобс-Декон»

Table 6

Ranking of alternatives for three characteristics by the intuitive method and by Decon Jobs integrated estimation tool

Множество альтернатив, $m$	Цена, руб.	Прочность при сжатии, МПа	Плотность, кг*с/см <sup>3</sup>	Порядковый № в интуитивном ранжированном ряду	Порядковый № в ранжированном ряду по «Джобс-Декон»
1	4600	23	2241	IV	V
2	5000	25	2315	III	IV
3	5200	27	2363	II	III
4	5500	29	2294	I	I
5	5700	30	2250	II	II

$$m_{инт} = \{4 \succ 3 = 5 \succ 2 \succ 1\}$$

$$m_{Джс} = \{4 \succ 5 \succ 3 \succ 2 \succ 1\}$$

$$K_{эфф.} = \frac{3}{5}$$

Затем осуществим процедуру сравнения результатов, полученных интуитивным способом и при помощи моделей предпочтений в «Джобс-Декон», рис. 8.

Сравнив результаты (рис. 2), мы пришли к выводу, что респондент не способен ранжировать материал правильно, руководствуясь только интуицией в случаях сложности задачи выбора по параметрам многоальтернативности, многофакторности исходных данных и чувствительности к их динамике, а также в условиях опасности манипулирования результатами со сто-



роны внешней среды. Механизм «Джобс-Декон» является механизмом нового поколения, позволяющим сократить путь между интуитивным пониманием задачи ранжирования и выбора и представлением ее решения в информационной среде за счет отказа от вербального описания работы интуиции в данном классе задач [3].

Таблица 7

**Ранжирование альтернатив по четырем характеристикам интуитивным способом и при помощи механизма комплексного оценивания «Джобс-Декон»**

Table 7

**Ranking of alternatives for four characteristics by the intuitive method and by Decon Jobs integrated estimation tool**

Множество альтернатив $m$	Цена, руб.	Прочность при сжатии, МПа	Плотность, кг*с/см <sup>3</sup>	Морозостойкость, цикл	Порядковый № в интуитивном ранжированном ряду	Порядковый № в ранжированном ряду по «Джобс-Декон»
1	4600	23	2241	202	III	IV
2	5000	25	2315	175	IV	V
3	5200	27	2363	178	III	III
4	5500	29	2294	222	I	I
5	5700	30	2250	225	II	II

$$m_{инт} = \{4 \succ 5 \succ 3 = 1 \succ 2\}$$

$$m_{Джс} = \{4 \succ 5 \succ 3 \succ 1 \succ 2\}$$

$$K_{эфф.} = \frac{3}{5}$$

Таблица 8

**Ранжирование альтернатив по пяти характеристикам интуитивным способом и при помощи механизма комплексного оценивания «Джобс-Декон»**

Table 8

**Ranking of alternatives for five characteristics by the intuitive method and by Decon Jobs integrated estimation tool**

Множество альтернатив, $m$	Цена, руб.	Прочность при сжатии, МПа	Плотность, кг*с/см <sup>3</sup>	Морозостойкость, цикл	Водонепроницаемость, коэфф.	Порядковый № в интуитивном ранжированном ряду	Порядковый № в ранжированном ряду по «Джобс-Декон»
1	4600	23	2241	202	4	IV	IV
2	5000	25	2315	175	6	IV	II
3	5200	27	2363	178	7	III	II
4	5500	29	2294	222	5	I	I
5	5700	30	2250	225	7	II	I

$$m_{инт} = \{4 \succ 5 \succ 3 \succ 1 = 2\}$$

$$m_{Джс} = \{4 = 5 \succ 3 \succ 2 \succ 1\}$$

$$K_{эфф.} = \frac{2}{5}$$

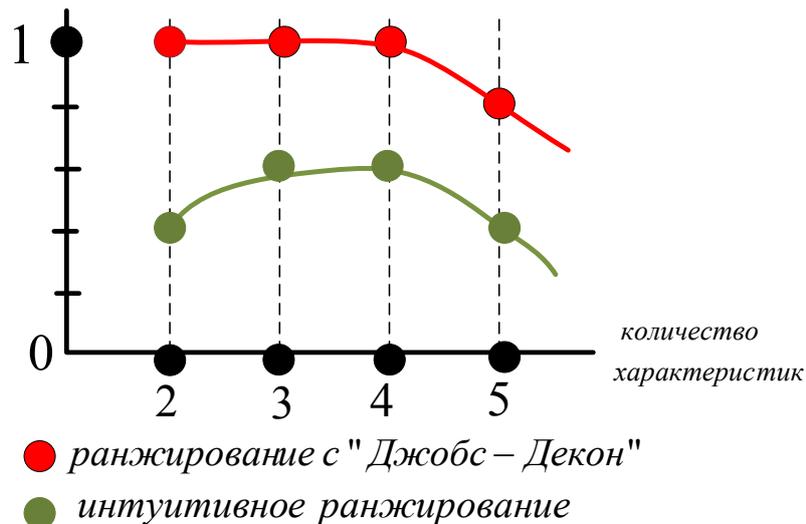


Рис. 8. Сравнение результатов интуитивного выбора строительных материалов с моделью предпочтений субъекта в программе «Джобс-Декон»  
Fig. 8. Comparison of building material intuitive choice results and a model of subject preferences in Decon Jobs program

### Выводы

Нарушение отношения строгого порядка между альтернативами делает невозможным решение задачи выбора. Преодолеть эту проблему предлагается за счет расширения для субъекта выбора области определения корректных задач ранжирования/выбора, обеспеченных гарантированным выполнением отношения строгого порядка на основе механизации его ментальной деятельности помощи механизма комплексного оценивания, основанного на линейной свертке и известном положении Стива Джобса о целесообразности «соединения креативности и технологичности». По сравнению с интуитивным выбором представленный механизм позволяет сократить путь между интуитивным пониманием задачи выбора и представлением ее решения в информационной среде за счет отказа от вербального описания работы интуиции в данном классе задач, тем самым сокращает риски установления нестрогого порядка между альтернативами.

### Библиографический список

1. Бурков В.Н., Исаков М.Б., Коргин Н.А. Применение обобщенных медианных схем для построения неманипулируемых механизмов многокритериальной активной экспертизы // Проблемы управления. 2008. № 4. С. 38–47.
2. Ильин И.В. Поведение потребителей. Санкт-Петербург: Питер, 2000. 224 с.
3. Кривоги́на Д.Н., Сафо́нов Н.И., Харито́нов В.А., Вычегжа́нин А.В., Гревце́в А.М. Инструментальные средства «соединения креативности и технологичности» в задачах субъектноориентированного управления [Электронный ресурс] // Интернет-журнал «Управление экономическими системами». 2017. URL: <http://uecs.ru/instrumentalniimetodyekonomiki.pdf> (дата обращения: 13.07.2018).
4. Кривоги́на Д.Н., Харито́нов В.А., Алексе́ев А.О. Парадигма инженерной поддержки технологий субъектно-ориентированного управления [Электронный ресурс] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2015. № 112 (08). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/paradigma-inzhenernoy-podderzhki-tehnologiy-subektno-orientirovannogo-upravleniya.pdf> (дата обращения: 13.07.2018).
5. Мухина М.К. Изучение стиля жизни потребителей и сегментирование рынка на основе психографических типов [Электронный ресурс] // Журнал «Маркетинг в России и за рубежом». 2000. Т. 3. URL: <http://www.mavriz.ru/articles/2000/3/262.html> (дата обращения: 23.06.2018).
6. Мыльников Л.А. Поддержка принятия решений при управлении инновационными проектами. Пермь: Изд-во Пермского гос. техн. ун-та, 2010. 245 с.



7. Подиновский В.В. Введение в теорию важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений. М.: Физматлит, 2007. 64 с.
8. Федосов С.В., Грузинцева Н.А., Лыскова М.А., Гусев Б.Н., Никитина Т.Ю., Никифорова Н.Е. Методика оценки оптимального ассортимента предприятия по производству геотекстильных строительных материалов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2015. С. 49–55.
9. Фейгенбаум А., Гличев А.В. Контроль качества продукции. М.: Экономика, 1986. 471 с.
10. Al-Hammad A.-M., Hassanain M.A., Juaim M.N. Evaluation and selection of curtain wall systems for medium-high rise building construction (2014). *Structural Survey*, 32 (4). P. 299–314. DOI: 10.1108/SS-10-2013-0035.
11. Kono J., Ostermeyer Y., Wallbaum H. Trade-off between the social and environmental performance of green concrete: The case of 6 countries. *Sustainability (Switzerland)*, 2018. 10 (7). 2309. DOI: 10.3390/su10072309.
12. Lauven L.-P., Karschin I., Geldermann J. Simultaneously optimizing the capacity and configuration of biorefineries (2018). *Computers and Industrial Engineering*. 2018. Vol. 124. P. 12–23. DOI: 10.1016/j.cie.2018.07.014.
13. Mos B., Dworjanyan S.A., Mamo L.T., Kelaher B.P. Building global change resilience: Concrete has the potential to ameliorate the negative effects of climate-driven ocean change on a newly-settled calcifying invertebrate (2019). *Science of the Total Environment*. 2018. Vol. 646. P. 1349–1358. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.379.
14. Rohden A.B., Garcez M.R. Increasing the sustainability potential of a reinforced concrete building through design strategies: Case study (2018). *Case Studies in Construction Materials*, 9. P. e00174. DOI: 10.1016/j.cscm.2018.e00174.

### References

1. Burkov V.N., Iskakov M.B., Korgin N.A. Use of generalized median schemes for the construction of non-manipulative mechanisms of multicriteria active examination. *Problemy upravleniya* [Control Sciences], 2008, no. 4, pp. 38–47. (In Russian)
2. Il'in I.V. *Povedenie potrebitel'ev* [Consumer behavior.]. Saint-Petersburg: Piter Publ., 2000, 224 p. (In Russian)
3. Krivogina D.N., Safonov N.I., Haritonov V.A., Vychezhnanin A.V., Grevcev A.M. *Instrumental'nye sredstva «soedineniya kreativnosti i tekhnologichnosti» v zadachah sub"ektnoorientirovannogo upravleniya* [Tools "connecting creativity and manufacturability" in the problems of subject-oriented management]. *Internet-zhurnal «Upravlenie ekonomicheskimi sistemami»* [Management of Economic Systems]. 2017. URL: <http://uecs.ru/instrumentalniimetodyekonomiki.pdf> (accessed 13 July 2018).
4. Krivogina D.N., Haritonov V.A., Alekseev A.O. *Paradigma inzhenernoj podderzhki tekhnologij sub"ektno-orientirovannogo upravleniya* [Engineering support paradigm of subject-oriented control technologies]. *Politematicheskij setevoy elektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University], 2015, no. 112 (08). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/paradigma-inzhenernoj-podderzhki-tehnologiy-subektno-orientirovannogo-upravleniya>. (accessed 13 July 2018).
5. Muhina M.K. *Izuchenie stilya zhizni potrebitel'ev i segmentirovanie rynka na osnove psihograficheskikh tipov* [Study of consumer lifestyle and psychographic type-based market segmentation]. *Zhurnal «Marketing v Rossii i za rubezhom»* [Journal of Marketing in Russia and Abroad]. 2000, vol. 3. URL: <http://www.mavriz.ru/articles/2000/3/262.html> (accessed 13 July 2018).
6. Myl'nikov L.A. *Podderzhka prinyatiya reshenij pri upravlenii innovacionnymi proektami* [Decision support in innovative project management]. Perm': Perm state technical University Publ., 2010, 245 p. (In Russian)
7. Podinovskij V.V. *Vvedenie v teoryu vazhnosti kriteriev v mnogokriterial'nyh zadachah prinyatiya reshenij* [Introduction to the theory of criteria importance in multi-criteria decision-making problems]. Moscow: Fizmatlit Publ., 2007, 64 p. (In Russian)
8. Fedosov S.V., Gruzinceva N.A., Lyskova M.A., Gusev B.N., Nikitina T.Yu., Nikiforova N.E. Estimation procedure to determine the optimal range of products for construction geotextiles material enterprises. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Stroitel'stvo* [News of higher educational institutions. Construction], 2015, pp. 49–55. (In Russian)
9. Fejgenbaum A., Glichev A.V. *Kontrol' kachestva produkcii* [Control of product quality]. Moscow: Ekonomika Publ., 1986, 471 p. (In Russian)
10. Al-Hammad A.-M., Hassanain M.A., Juaim M.N. Evaluation and selection of curtain wall systems for medium-high rise building construction (2014). *Structural Survey*, 32 (4), pp. 299–314. DOI: 10.1108/SS-10-2013-0035.
11. Kono J., Ostermeyer Y., Wallbaum H. Trade-off between the social and environmental performance of green concrete: The case of 6 countries. *Sustainability (Switzerland)*, 2018. 10 (7). 2309. DOI: 10.3390/su10072309.
12. Lauven L.-P., Karschin I., Geldermann J. Simultaneously optimizing the capacity and configuration of biorefineries (2018) *Computers and Industrial Engineering*. 2018, vol. 124, pp. 12–23. DOI: 10.1016/j.cie.2018.07.014.
13. Mos B., Dworjanyan S.A., Mamo L.T., Kelaher B.P. Building global change resilience: Concrete has the potential to ameliorate the negative effects of climate-driven ocean change on a newly-settled calcifying invertebrate (2019). *Science of the Total Environment*. 2018, vol. 646, pp. 1349–1358. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.379.
14. Rohden A.B., Garcez M.R. Increasing the sustainability potential of a reinforced con-crete building through design strategies: Case study (2018). *Case Studies in Construction Materials*, 9, p. e00174. DOI: 10.1016/j.cscm.2018.e00174.



**Критерии авторства**

Харитонов В.А., Кривоги́на Д.Н. совместно провели научный эксперимент, подготовили рукопись и заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов, несут ответственность за плагиат.

**Authorship criteria**

Kharitonov V.A., Krivogina D.N. together conducted a scientific experiment, prepared the manuscript and declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results. They bear equal responsibility for plagiarism.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interests**

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.311

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-10-92-116>

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОНОМНОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА БАЗЕ МИКРОГЭС И АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С КОНДЕНСАТОРНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

© Г.Г. Константинов<sup>1</sup>, Г.С. Майоров<sup>2</sup>

Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

**РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ.** Разработка оптимальной функциональной схемы электрооборудования микрогидро-электростанции, а также разработка и исследование автономного источника электроэнергии на базе микрогидроэлектростанции и асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением. **МЕТОДЫ.** Для достижения цели использовались методы математического и компьютерного моделирования, экспериментальные исследования проводились на компьютерных моделях. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Предложены оптимальная функциональная схема электрооборудования микрогидроэлектростанции, математическая модель и компьютерная модель микрогидроэлектростанции в программе Matlab/Simulink. Проведены исследования разработанной модели, позволившие сделать ряд важных выводов по ее практическому применению в качестве автономного источника электрической энергии. **ВЫВОДЫ.** Разработаны оптимальная функциональная схема электрооборудования микрогидроэлектростанции, математическая и компьютерная модели автономного источника электроэнергии на базе микрогидроэлектростанции и асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением. Проведенные исследования разработанной модели показали, что она работает корректно и может применяться при проектировании для конкретных районов и нагрузок.

**Ключевые слова:** микрогидроэлектростанция, асинхронный генератор, конденсаторное возбуждение, математическое и компьютерное моделирование.

**Информация о статье.** Дата поступления 16 августа 2018 г.; дата принятия к печати 25 сентября 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 октября 2018 г.

**Формат цитирования.** Константинов Г.Г., Майоров Г.С. Разработка и исследование автономного источника электроэнергии на базе микроГЭС и асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 10. С. 92–116. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-92-116

## DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A STAND ALONE POWER SOURCE BASED ON MICRO HPP AND INDUCTION GENERATOR WITH CAPACITOR EXCITATION

G.G. Konstantinov, G.S. Maiorov

Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

**ABSTRACT.** The **PURPOSE** of the study is development of an optimal functional diagram for the electrical equipment of micro hydroelectric power plant (HPP), as well as the development and study of a stand alone source of electric power based on micro HPP and an induction generator with capacitor excitation. **METHODS.** The set purpose is achieved through the use of the methods of mathematical and computer modeling. Experimental studies are conducted on computer models. **RESULTS.** An optimum functional diagram of micro HPP electrical equipment, a mathematical model and a computer model of micro HPP in Matlab/Simulink program are proposed. The research of the developed model has allowed to draw

<sup>1</sup>Константинов Геннадий Григорьевич, кандидат технических наук, профессор кафедры электропривода и электрического транспорта, e-mail: [kgg40@mail.ru](mailto:kgg40@mail.ru)  
Gennady G. Konstantinov, Candidate of technical sciences, Professor of the Department of Electric Drive and Electric Transport, e-mail: [kgg40@mail.ru](mailto:kgg40@mail.ru)

<sup>2</sup>Майоров Глеб Сергеевич, магистрант, e-mail: [mayorov-555@mail.ru](mailto:mayorov-555@mail.ru)  
Gleb S. Maiorov, Master Degree student, e-mail: [mayorov-555@mail.ru](mailto:mayorov-555@mail.ru)



a number of important conclusions on its practical application as a stand alone source of electric energy. **CONCLUSIONS.** We have developed an optimal functional diagram of micro HPP electrical equipment, a mathematical and computer models of a stand alone electric power source based on a micro HPP and an induction generator with capacitor excitation. The conducted studies of the developed model have shown its correct operation that provides the opportunity to be used in design for specific areas and loads.

**Keywords:** *micro hydroelectric power plant (HPP), induction generator, capacitor excitation, mathematical and computer modeling.*

**Information about the article.** Received August 16, 2018; accepted for publication September 25, 2018; available online October 31, 2018.

**For citation.** Konstantinov G.G., Maiorov G.S. Development and research of a stand alone power source based on micro HPP and induction generator with capacitor excitation. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 10, pp. 92–116. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-92-116. (In Russian).

## Введение

В нашей стране большая часть территории находится вне централизованной системы энергоснабжения и на ней проживает около 10 млн человек. В связи с этим на данных территориях перспективным направлением является использование местных возобновляемых энергоресурсов. Это позволит существенно экономить количество жидкого и твердого топлива, доставка которых необходима для обеспечения жизнедеятельности. Подключение отдаленных потребителей к единой энергосистеме и строительство для этих целей воздушных линий электропередач, с учетом постоянно растущих цен на строительные материалы, представляется экономически нецелесообразным. Проблема энергоснабжения отдаленных потребителей может решаться с помощью возобновляемых источников энергии. Наиболее доступным и дешевым источником электрической энергии является гидроэнергетический потенциал малых рек, который реализуется путем постройки микрогидроэлектростанции (микроГЭС).

В качестве генераторов в микроГЭС нашли применение как синхронные, так и асинхронные генераторы. Асинхронные генераторы с короткозамкнутым ротором проще, дешевле и надежнее, но требуют устройства для их возбуждения и регулирования [1].

К настоящему времени выполнен ряд обширных исследований в этой области [2, 3], рассмотрена физическая картина конденсаторного самовозбуждения, сформулирован ряд критериев и условий самовозбуждения, предложены методы определения границ области устойчивой работы, созданы конденсаторы с малой удельной массой, реализованы различные варианты управляемых источников реактивной мощности и регуляторов напряжения на базе силовых интегральных полупроводниковых модулей. Вместе с тем требует более глубокого исследования динамика процесса конденсаторного самовозбуждения, сброса-наброса нагрузки с учетом эффекта насыщения магнитопровода и влияния механической характеристики первичного двигателя.

Цель настоящего исследования – разработка и исследование микроГЭС с асинхронным генератором.

Объектом исследования является микроГЭС с асинхронным генератором.

Предмет исследования – зависимость параметров электроэнергии, вырабатываемой микроГЭС, от характеристик нагрузки.

Методы исследования – математическое и компьютерное моделирование системы.

Теоретическая значимость исследования – выявление оптимальных условий процесса самовозбуждения асинхронного генератора при различных начальных режимах.

Практическая значимость исследований – применение серийных асинхронных машин в качестве генератора электроэнергии на микроГЭС.

По принятой в России классификации к классу микроГЭС относят гидравлические электростанции мощностью до 100 кВт<sup>3</sup>. В отличие от крупных ГЭС, работающих в составе энергосистем, микроГЭС в большинстве случаев используются для электроснабжения мелких изолированных потребителей, удаленных от сетей централизованного электроснабжения. Основную долю затрат при сооружении крупных ГЭС составляет стоимость гидротехнических сооружений. Для микроГЭС сооружение плотин не требуется. Как правило, используется русловая или деривационная схема электростанции (рис. 1), по которой часть воды из реки отводится в напорный трубопровод и после использования в гидротурбине опять сбрасывается в реку.

Источниками ресурсов для малой гидроэнергетики являются естественные и искусственные водотоки (малые и средние реки, ручьи, оросительные и судоходные каналы), водосбросы из водохранилищ, искусственных прудов, шлюзов, различные гидравлические системы (питьевые водоводы, технологические водотоки, водосбросы ТЭЦ и АЭС). МикроГЭС лишены многих недостатков, характерных для больших ГЭС: они не требуют больших капитальных вложений, практически не оказывают негативного воздействия на окружающую среду, для их обслуживания не нужен квалифицированный персонал.

Потребителями энергии в этих районах являются в большинстве случаев различные сельскохозяйственные объекты, небольшие поселки, коттеджи и т.д. Установленная мощность электрических нагрузок составляет от единиц до нескольких десятков кВт, в составе нагрузок преобладают различные бытовые приборы. График нагрузки крайне изменчив, возможна значительная несимметричная загрузка по фазам источника питания. В настоящее время электрификация подобных объектов осуществляется в основном от автономных дизельных электростанций, а себестоимость электроэнергии может достигать 15–25 руб. за кВт·ч [4].

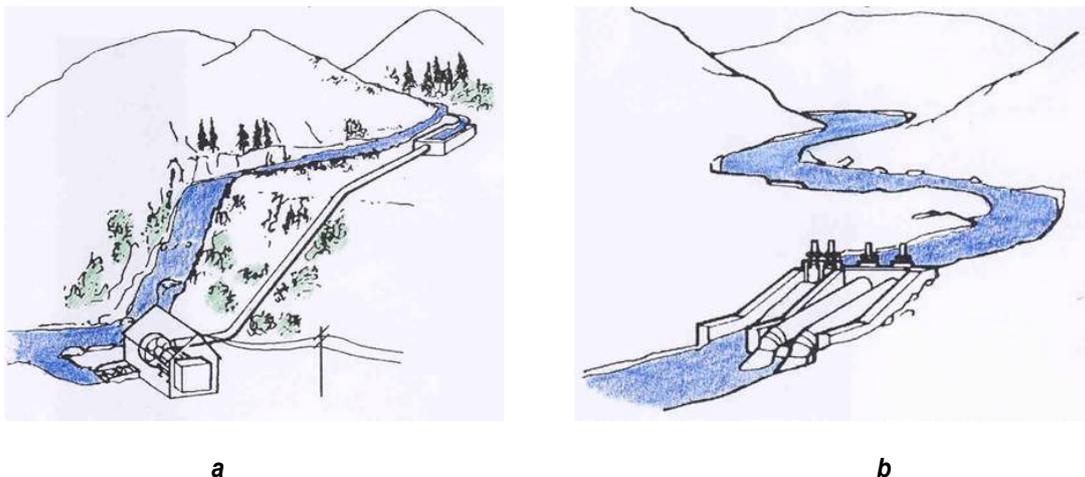


Рис. 1. Схемы создания напора в микроГЭС: а – деривационная; б – русловая  
Fig. 1. Schemes of head creation in a micro HPP: a – derivational; b – channel

Отмеченные выше особенности размещения и эксплуатации автономных систем электроснабжения позволяют сформулировать основные требования, предъявляемые к микроГЭС:

- простота и надежность конструкции;
- высокое качество выходных электрических параметров в статических и динамических режимах;
- соответствие вырабатываемого электрического тока требованиям ГОСТов по частоте и напряжению;

<sup>3</sup>Лукутин Б.В. Возобновляемые источники электроэнергии: учеб. пособ. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. 184 с. / Lukutin B.V. Renewable energy sources: Learning aids. Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publ., 2008. 184 p.

- полностью автоматизированный режим работы;
- экологическая безопасность принятых проектных, конструкторских и технологических решений;
- компенсация возможной несимметрии по фазам.

Основное технологическое оборудование микроГЭС должно быть по возможности серийным, а ее система управления должна обеспечивать полностью автоматизированный режим работы при минимальном техническом обслуживании.

### Разработка оптимальной функциональной схемы электрооборудования микроГЭС

Для решения этой задачи необходимо проанализировать существующие конструкции микроГЭС. Известно множество различных конструкций микроГЭС, но все они имеют схожую структуру и принцип работы [5]. Из верхнего резервуара водохранилища 1 (рис. 2) через водозаборник 2 вода по подводящему трубопроводу 3 поступает на энергоблок 4 в составе микротурбины и генератора, в качестве которого использован трехфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором. Вырабатываемый электрический ток с напряжением 400 В и частотой 50 Гц поступает на клеммы блока автоматического регулирования напряжения и частоты 6, который путем перераспределения электроэнергии между потребителем и автобалластной нагрузкой 7 стабилизирует параметры тока. Неиспользованная потребителем энергия в нагревательных элементах автобалластной нагрузки превращается в тепло, которое можно использовать для обогрева жилищ или хозяйственных помещений. Автобалластная нагрузка снабжена заземлением 8.

По напору водного потока различают микроГЭС для низкого (менее 15 м), среднего (15–50 м) и высокого (более 50 м) напора.

По способу создания напора малые ГЭС делятся на плотинные, деривационные, смешанные (плотинно-деривационные) и ГЭС при готовом напорном фронте.

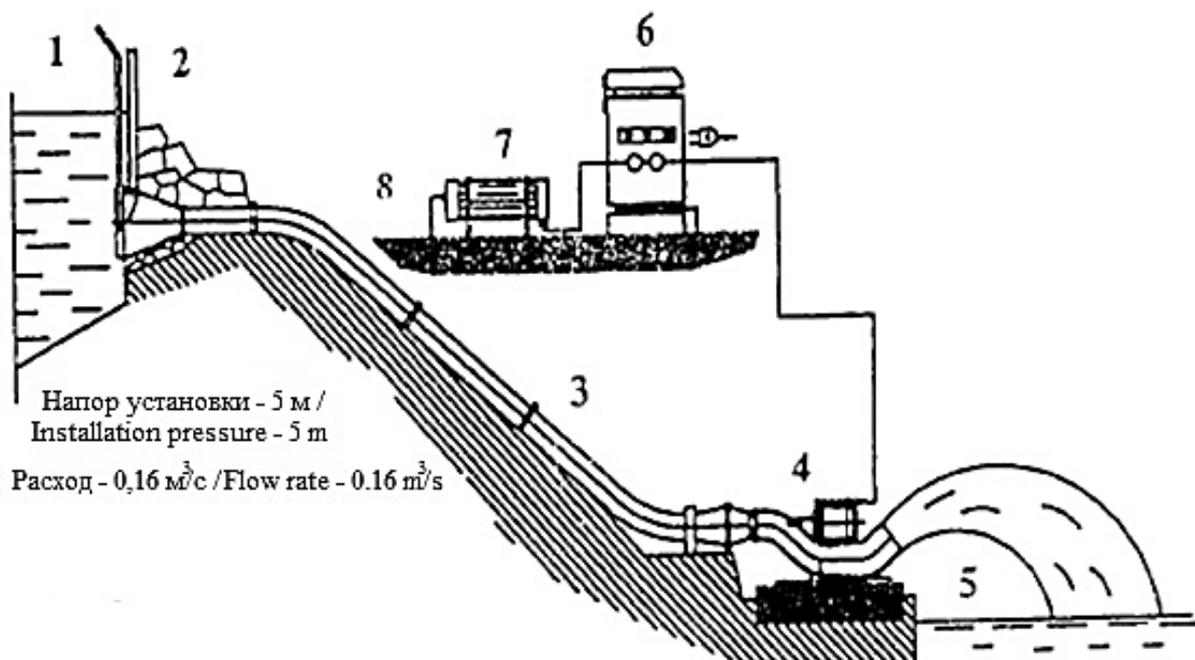


Рис. 2. Общая схема конструкции микроГЭС  
Fig. 2. General scheme of a micro HPP design

### Анализ гидротурбин микроГЭС

По типу гидротурбин малые ГЭС делятся на два класса:

- 1) микроГЭС с реактивными турбинами;
- 2) микроГЭС с активными турбинами.

Кроме этого, турбины можно классифицировать по типу рабочего колеса, по расположению в гидроагрегате, по напорам и т.д. Поскольку выбор типа турбины связан со многими показателями (требованиями), то будет целесообразно провести подробный анализ гидрооборудования для микроГЭС.

Гидравлическими турбинами называются машины, преобразующие энергию воды в механическую энергию вала гидротурбины. Механическая энергия турбины обычно преобразуется в электрическую энергию электрогенератора, смонтированного на одном валу с турбиной. Проточный тракт гидротурбины, в общем случае, состоит из следующих элементов (рис. 3):

- 1 – рабочего колеса, состоящего из вала и системы лопастей специального профиля;
- 2 – направляющего аппарата;
- 3 – устройства, подводящего воду;
- 4 – устройства, отводящего воду.

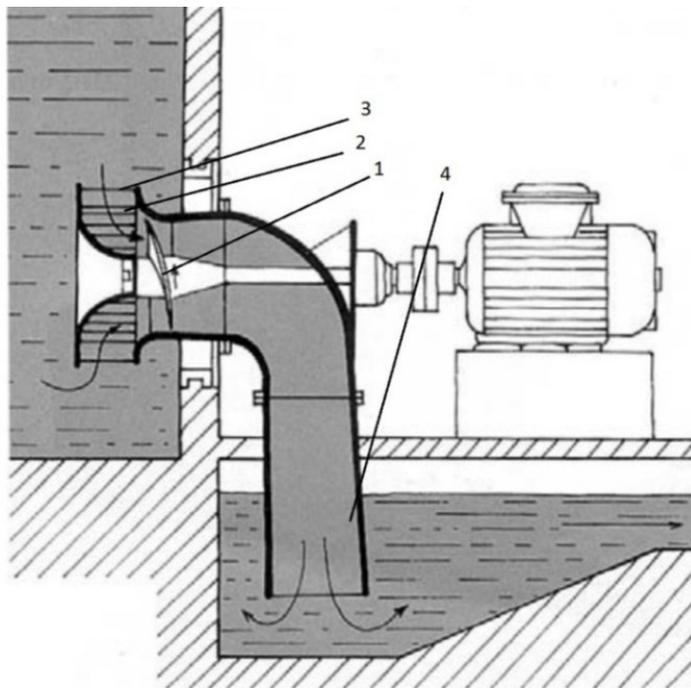


Рис. 3. Проточный тракт гидротурбины  
Fig. 3. Flow path of a hydroturbine

Турбина Пелтона принадлежит к типу импульсных турбин, где имеющийся напор воды преобразуется в кинетическую энергию на внешнем диаметре колеса при атмосферном давлении. Практическое применение турбина Пелтона находит при высоте напора воды более 40 м.

Другим типом активных турбин является наклонно-струйная турбина Тюрго, которая используется на высокие напоры от 30 до 400 м.

Главной особенностью турбины «Банки» является двойное преобразование энергии, которое происходит во время «попадания» воды на лопасти на входе и выходе из полого ротора. Использование двух рабочих фаз не обеспечивает никакого особенного преимущества за исключением того, что это очень эффективный и простой способ отвода воды из ротора. В современных микроГЭС турбины поперечно-струйного течения используются при напорах от 2 до 100 м.

При малых напорах воды в микроГЭС используют реактивные турбины пропеллерного типа, наиболее известной из которых является турбина Каплана.

В турбине Каплана вода попадает на направляющие лопасти, а затем течет вдоль оси винта (такой тип турбин еще называют осевым). Важным достоинством турбины Каплана является высокая скорость вращения винта, которая вдвое больше скорости потока воды. Другой положительной особенностью этого типа турбин является возможность регулирования их производительности за счет изменения открытия направляющего аппарата и поворота лопастей винта. Турбины Каплана применяют при напорах от 1 до 30 м.

При относительно больших напорах воды (30÷250 м) применяют другой тип реактивных турбин, получивших название турбины Френсиса. Рабочее колесо турбины Френсиса полностью погружено в воду, а давление и скорость воды уменьшаются в процессе ее прохождения через турбину. Вода течет радиально по кольцевому каналу, который окружает рабочее колесо турбины между неподвижными лопастями, направляющими поток воды.

Каждый тип гидротурбин соответствует определенному диапазону напора и расхода воды и имеет свою преимущественную область применения. Для большей части России характерно наличие равнинных рек с небольшими (не более 10 м) напорами. Исходя из этого, был сделан вывод о возможности применения турбин типа «Банки» и «Каплан». Но так как турбины «Банки» слишком громоздки, было принято решение использовать турбину «Каплан».

В отличие от традиционных гидромашин, разработка микроГЭС ведется не из критерия достижения максимального коэффициента полезного действия (КПД), а из получения простой и технологичной конструкции турбины. Упрощения достигаются прежде всего за счет элементов регулирования параметров турбины. Как правило, у них сокращаются размеры или они исключаются вовсе. В частности, в большинстве разработанных микроГЭС лопасти турбины выполняются жестко установленными в одном положении. Поэтому она теряет возможность изменять их угол поворота и подстраиваться под изменяющийся поток воды. Это конструктивное решение нацелено избежать дорогостоящей системы привода механических частей гидротурбины.

### Автобалластное регулирование выходных параметров микроГЭС

Упростить конструкцию турбин и добиться большего быстродействия регуляторов частоты возможно путем регулирования величины нагрузки энергоустановки. Такая возможность определяется зависимостью частоты вращения турбины от развиваемой ею мощности, которая в автономных системах электроснабжения потребляется электрической нагрузкой. Следовательно, выбирая соответствующую нагрузку источника электропитания, можно стабилизировать частоту вращения системы: генератор – приводная турбина. Изменять величину нагрузки автономного источника электропитания возможно включением на выход генератора регулируемой балластной нагрузки [6–13].

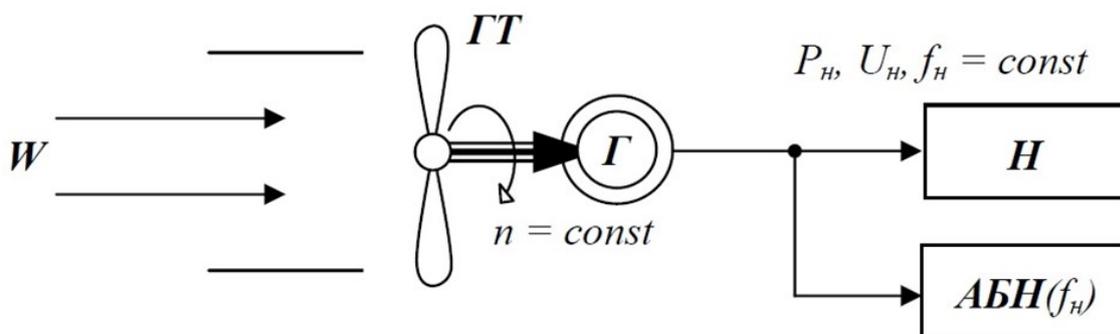


Рис. 4. Схема энергоустановки с автобалластным регулированием выходных параметров  
Fig. 4. Diagram of a power plant with autoballast regulation of output parameters



Если под «балластной» понимать некоторую полезную нагрузку, то данный способ стабилизации подразумевает автоматическое перераспределение электрической мощности между некоторыми потребителями, часть из которых допускает снижение величины питающего напряжения или его отключение. Схема энергоустановки с автобалластным регулированием выходных параметров показана на рис. 4.

Достоинствами данного способа является полное исключение электромеханических устройств из системы стабилизации частоты вращения гидротурбины. Такая система регулирования может иметь высокое быстродействие, что положительно скажется на качестве выходного напряжения источника электропитания. Благодаря стабилизации частоты вращения приводного двигателя в рассматриваемых типах электроустановок могут применяться общепромышленные генераторы без большого запаса механической прочности ротора.

### Генератор микроГЭС

Генератор является важнейшим элементом микроГЭС [14]. Он предназначен для эксплуатации вне помещений и должен иметь высокую надежность и низкую стоимость. Проектирование и изготовление генератора под конкретную систему не является целесообразным, так как это увеличивает стоимость изделия и делает затруднительным его замену в случае поломки. Поэтому в разрабатываемой микроГЭС следует использовать серийный электрический двигатель, работающий в режиме генератора<sup>4</sup>.

Простейшим в конструктивном отношении генератором является самовозбуждающийся асинхронный генератор (АГ). Он представляет собой трехфазную асинхронную машину (АМ) с короткозамкнутым ротором и подключенными параллельно к ее статорным обмоткам конденсаторами.

Статор асинхронного генератора не отличается от статора синхронного генератора. Ротор асинхронного генератора вращается с угловой скоростью, отличной от скорости вращения магнитного поля статора. Он бывает фазный (напряжение на него подается через контактные кольца) и короткозамкнутый. В первом случае теряется одно из основных достоинств асинхронных машин – бесконтактность. Особенностью асинхронного генератора является то, что для его работы требуется реактивная мощность, что усложняет и удорожает всю систему. Но асинхронный генератор со статорным самовозбуждением обладает рядом положительных свойств, характерных для машин с короткозамкнутым ротором: простотой, дешевизной, надежностью, бесконтактностью. Возбуждение осуществляется с помощью конденсаторов, подключенных параллельно статорным обмоткам.

Конденсаторы возбуждения у АГ выполняют роль фильтров, отсекающих высшие гармоники в выходном напряжении, что способствует исчезновению биений напряжений и длительных переходных процессов и позволяет получить выходное напряжение АГ идеально синусоидальным. Наличие короткозамкнутого ротора у АГ положительно сказывается на качестве электроэнергии при несимметричных нагрузках. Асинхронный генератор с короткозамкнутым ротором практически не греется, поэтому его корпус закрыт, что позволяет исключить попадание пыли и влаги.

До недавнего времени применение асинхронных генераторов сдерживалось резко падающей внешней характеристикой машины и отсутствием надежного и дешевого источника реактивной мощности. Однако в настоящее время появились легкие и относительно недорогие кон-

<sup>4</sup>ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01. Москва: Стандартинформ, 2014 / GOST 32144-2013 Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Quality standards of electrical energy in general-purpose power supply systems. Introduced 1 July 2014. Moscow: Standardinform, 2014.



денсаторы переменного тока, что дает предпосылки для успешного решения проблем применения АГ [15]. Кроме всего перечисленного, асинхронные генераторы обладают более высокой надежностью и простотой конструкции. Стоимость асинхронных машин в 1,5–2 раза меньше синхронных; вес – в 1,3–1,4 раза, габариты – в 1,5–2 раза, что обуславливает возможность их широкого применения в микроГЭС.

Таким образом, проведенный анализ возможных вариантов элементов конструкций микроГЭС показал, что наиболее подходящим вариантом является схема микроГЭС со следующей конфигурацией:

- русловые или деривационные электростанции, в которых часть воды из реки отводится в напорный трубопровод и после использования в гидротурбине опять сбрасывается в реку. Это позволяет значительно сократить сроки строительства и капитальные затраты на сооружение электростанции, обеспечивая минимальное негативное воздействие на окружающую среду;
- турбины типа «Банки» и «Каплан», поскольку для большей части России характерно наличие равнинных рек с небольшими (не более 10 м) напорами;
- асинхронный генератор в качестве генератора напряжения на базе серийного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором;
- регулируемый автобалласт для поддержания качества электроэнергии на должном уровне, главным компонентом которого является управляемый тиристорный выпрямитель, выполненный по мостовой схеме и имеющий активную нагрузку в цепи постоянного тока.

Достоинствами данной схемы микроГЭС является полное исключение электромеханических устройств из системы стабилизации частоты вращения гидротурбины. Такая система регулирования позволит иметь высокое быстродействие, что положительно скажется на качестве выходного напряжения источника электропитания.

### Математическая модель генератора

Развитие общей теории электрических машин показало, что для описания поведения в электромеханической системе электрическую машину удобно рассматривать как совокупность магнитосвязанных электрических цепей с сосредоточенными параметрами. При таком подходе электрическая машина описывается в общем случае системой дифференциальных уравнений с периодическими коэффициентами, для исключения которых применяют различные координатные преобразования. Выбор новой системы координат определяется особенностями конкретной схемы, режимами работы машины, целью исследований. Для моделирования трехфазного асинхронного генератора, обмотка статора которого соединена звездой с изолированной нейтралью, используются уравнения асинхронной машины в прямоугольной системе координат  $dq$ , вращающихся со скоростью  $\omega_k$  [7].

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Psi_{sd}}{dt} &= u_{sd} - i_{sd}R_s + \omega_k \Psi_{sq} \\ \frac{d\Psi_{sq}}{dt} &= u_{sq} - i_{sq}R_s - \omega_k \Psi_{sd} \\ \frac{d\Psi_{rd}}{dt} &= -i_{rd}R_r + (\omega_k - \omega)\Psi_{rq} \\ \frac{d\Psi_{rq}}{dt} &= -i_{rq}R_r - (\omega_k - \omega)\Psi_{rd} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь потокосцепления:



$$\left. \begin{aligned} \Psi_{sd} &= L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \Psi_{sq} &= L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \Psi_{rd} &= L_m i_{sd} + L_r i_{rd} \\ \Psi_{rq} &= L_m i_{sq} + L_r i_{rq} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Напряжения и токи в старой и новой системе координат связаны следующими соотношениями:

$$\begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2\sin\vartheta & \sin\vartheta - \sqrt{3}\cos\vartheta \\ 2\cos\vartheta & \cos\vartheta + \sqrt{3}\sin\vartheta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{sab} \\ u_{sbc} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\vartheta & \sin\vartheta \\ \frac{-\cos\vartheta + \sqrt{3}\sin\vartheta}{2} & \frac{-\sin\vartheta - \sqrt{3}\cos\vartheta}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sq} \\ i_{sd} \end{bmatrix}$$

$$i_{sc} = -i_{sa} - i_{sb} \quad (4)$$

Электромагнитный момент:

$$M = \frac{3}{2} (\psi_{sd} i_{sq} - \psi_{sq} i_{sd}). \quad (5)$$

Уравнение механического равновесия:

$$M_T = M_r + Jd\omega / dt, \quad (6)$$

где  $J$  – момент инерции вращающихся частей ротора и гидротурбины.

Математическое описание процессов в АД возможно при использовании уравнений асинхронной машины при следующих общепринятых допущениях:

- 1) равномерный гладкий воздушный зазор;
- 2) поле в воздушном зазоре круговое;
- 3) обмотки статора и ротора расположены симметрично;
- 4) потери от гистерезиса и от вихревых токов отсутствуют;
- 5) активные сопротивления обмоток статора и ротора постоянны.

Насыщение магнитной цепи асинхронной машины определяется воздействием как поля основной гармоники воздушного зазора, так и полей рассеяния. Для учета насыщения в исходные данные была введена кривая намагничивания  $U_n = f(I_\mu)$ , полученная расчетным путем.

### Математическая модель гидротурбины

В микроГЭС находят применение турбины самых различных типов. Однако, несмотря на значительные различия в конструкции и рабочих характеристиках, все гидротурбины для мик-



роГЭС можно моделировать по одному общему алгоритму. Скорость изменения частоты вращения приводного вала гидротурбины определяется моментом инерции вращающихся частей. Величина момента инерции, в свою очередь, зависит от масс ротора генератора и активной части гидротурбины, а также от их диаметров. Для реальных электроустановок, значение инерционной постоянной времени намного больше электромагнитных постоянных. Соответственно, гидротурбина с достаточной точностью моделируется математическим описанием ее реальной моментной характеристики. В [4] было доказано, что все нерегулируемые малые пропеллерные гидротурбины имеют одинаковые моментные характеристики. Их можно выразить в системе относительных единиц уравнением:

$$M_t = 1,2M_{ном} - \frac{0,18M_{ном}\omega_T^2}{\omega_{ном}^2}, \quad (7)$$

где  $M_{ном}$ ,  $\omega_{ном}$  – номинальный момент и частота вращения.

По уравнению (7) была построена зависимость момента турбины от частоты вращения (рис. 5).

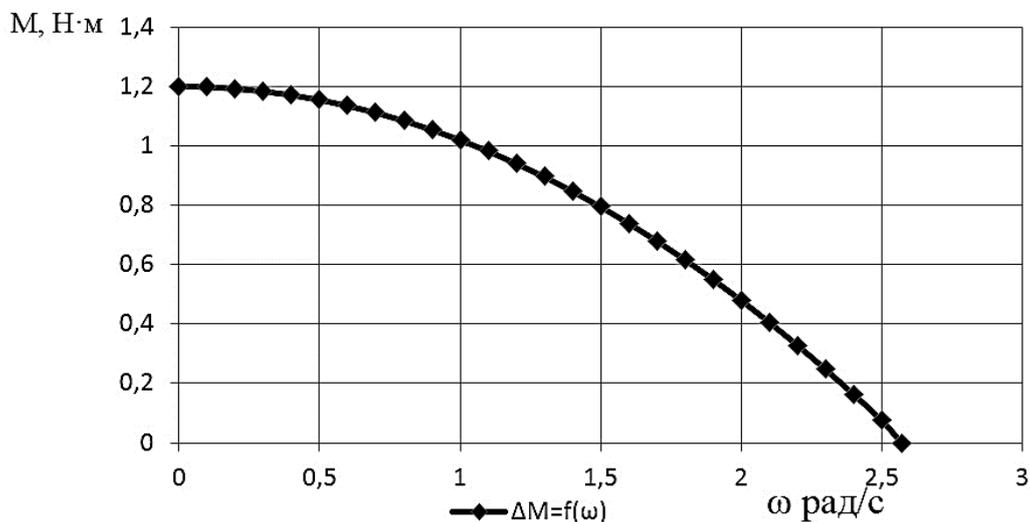


Рис. 5. Механическая характеристика турбины  
Fig. 5. Turbine mechanical characteristic

Из уравнения получаются два коэффициента:

$$k_1 = 1,2 \cdot M_{ном}; \quad (8)$$

$$k_2 = \frac{0,18M_{ном}}{\omega_{ном}^2};$$

где

$$M_{ном} = \frac{P_{ген}}{\eta\omega}; \quad (9)$$

$$M_m = M_{ном} \cdot M_{отн.ед.}; \quad (10)$$



$$\omega_m = \omega_{ном} \cdot \omega_{отн.ед.} \quad (11)$$

где  $M_{отн.ед.}$ ,  $\omega_{отн.ед.}$  – момент и частота вращения в относительных единицах.

В работе рассматривается гидротурбина с номинальной частотой вращения 1000 об/мин, а мощность генератора 45 кВт. Исходя из этого, рассчитывается и строится механическая характеристика турбины.

$$M_{ном} = \frac{P_{ген}}{\eta\omega} = \frac{45000}{0,86 \cdot 104,67} = 499,91 \text{ Нм}. \quad (12)$$

$$k_1 = 1,2 \cdot M_{ном} = 1,2 \cdot 499,91 = 599,892. \quad (13)$$

$$k_2 = \frac{0,18M_{ном}}{\omega_{ном}^2} = \frac{0,18 \cdot 499,91}{104^2} = 0,0083. \quad (14)$$

Согласующим уравнением, связывающим блоки гидротурбина-генератор, в математической модели микроГЭС является уравнение механического равновесия:

$$M_T = M_G + \frac{Jd\omega}{dt}, \quad (15)$$

где  $J$  – момент инерции вращающихся частей ротора и гидротурбины.

При автобалластном регулировании выходных электрических параметров микроГЭС генератор работает на сложную комплексную нагрузку, часть из которой является вентильной. Поэтому перед системой управления стоит задача автоматического перераспределения мощности между потребителем и автобалластом [11–13].

Использованная в работе система управления (СУ) имеет два канала контроля параметров электроэнергии – по активной составляющей тока генератора и по его напряжению. Такая СУ выдает сразу два сигнала открытия тиристоров ( $\alpha$ ), хотя для управления автобалластом требуется только один. Поэтому эти два сигнала суммируются, причем токовый канал со знаком плюс, а канал напряжения – со знаком минус. Канал регулирования по току вычисляет действующее значение тока в цепи. Чем больше сила тока, тем больше угол открытия тиристоров. Для корректной работы автобалласта  $\alpha$  должно варьироваться в пределах от 0 до 90°. Поэтому значение тока умножается на коэффициент  $K_i$ .

$$K_i = \frac{90^\circ}{I_{1ном}}. \quad (16)$$

В итоге канал регулирования по току может быть описан уравнением:

$$I_a \cdot K_i = \alpha_1. \quad (17)$$

В данной работе  $I_{1ном} = 65 \text{ А}$ , поэтому

$$K_i = \frac{90}{65} = 1,38. \quad (18)$$

Канал регулирования по напряжению вычисляет действующее значение напряжения.

Его величина сравнивается с эталонным значением ( $U_{ном} = 400 В$ ). После чего выдается величина отклонения напряжения ( $\Delta U_{л}$ ) от номинала. При этом  $\Delta U_{л}$  меньше нуля, если напряжение ниже нормы и  $\Delta U_{л}$  больше нуля, если оно больше. Для корректной работы автобалласта значение напряжения умножается на коэффициент  $Ku$ :

$$Ku = \frac{90^\circ}{U_{л}}. \quad (19)$$

В итоге канал регулирования по напряжению может быть описан уравнением:

$$(U_{л} - U_{ном}) \cdot Ku = \alpha_2. \quad (20)$$

В данной работе  $U_{л} = 400 В$ , поэтому

$$Ku = \frac{90}{400} = 0,225. \quad (21)$$

Сигналы  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  с обоих каналов суммируются. Величина  $\alpha$  не должна превышать  $90^\circ$ . При  $\alpha = 90^\circ$  тиристоры находятся в закрытом состоянии. В итоге работу двух каналов регулирования можно выразить уравнением:

$$(I_{л} \cdot Ki) - ((U_{л} - U_{ном}) \cdot Ku) = \alpha \leq 90^\circ. \quad (22)$$

### Математическая модель автобалласта

Автобалластная нагрузка состоит из управляемого тиристорного выпрямителя (рис. 6), выполненного по трехфазной мостовой схеме с активной нагрузкой в цепи постоянного тока. Тиристоры моделировались как управляемые ключи с учетом порогового напряжения и динамического сопротивления в открытом состоянии. Угол открывания тиристоров формировался пропорционально току нагрузки с поправкой на отклонение от заданного напряжения.

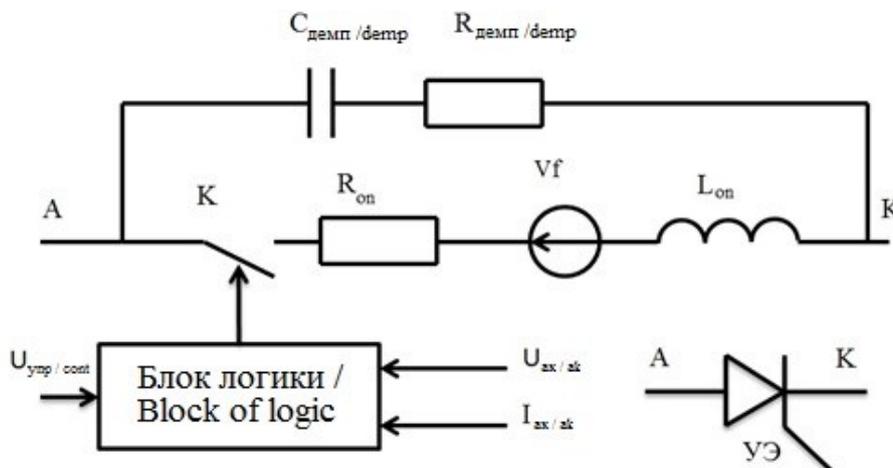


Рис. 6. Автобалластная нагрузка  
Fig. 6. Autoballast load

Математическая модель тиристора [7]:

$$\begin{cases} U_T = U_C + R_\theta C \frac{dU_C}{dt}, \\ U_T = U_0 + iR_{on} \end{cases} \quad (23)$$

где  $U_C$  – напряжение на демпфирующем конденсаторе;  $C$  – емкость демпфирующего конденсатора;  $R_\theta$  – сопротивление демпфирующей цепочки;  $U_0$  – пороговое напряжение р-п перехода;  $i$  – ток через тиристор;  $R_{on}$  – эквивалентное активное сопротивление в открытом состоянии.

### Разработка компьютерной модели элементов оборудования микроГЭС

Актуальность создания компьютерной модели микроГЭС обусловлена необходимостью исследования различных режимов работы оборудования при различных характеристиках генератора, мощности и характере нагрузки, начальных условиях. На рис. 7 представлена принятая электрическая схема микроГЭС.

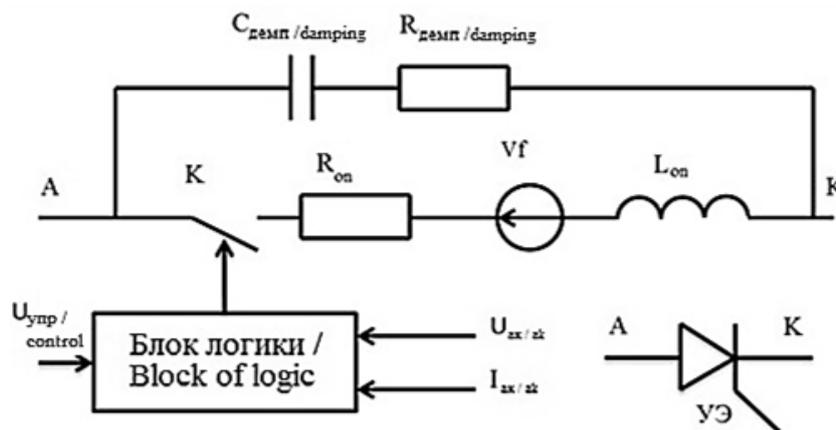


Рис. 7. Электрическая схема микроГЭС: АГ – асинхронный генератор; ГТ – гидротурбина; С – конденсаторные батареи; РБН – регулятор балластной нагрузки;  $R_6$  – балластная нагрузка;  $Z_H$  – полезная нагрузка

Fig. 7. Electrical circuit of a micro HPP: АГ – induction generator; ГТ – hydraulic turbine; С – capacitor batteries; РБН – ballast load regulator;  $R_6$  – ballast load;  $Z_H$  – payload

На основании математической модели была построена компьютерная модель микроГЭС. Компьютерная модель (рис. 8) содержит следующие подсистемы: автобалластную нагрузку (АВН), блок нагрузки и конденсаторов возбуждения (RCN), асинхронный генератор (АГ) и гидротурбину (ГТ).

### Исследование различных режимов работы асинхронного генератора

**Исследование системы при учете и без учета эффекта насыщения магнитопровода.** Цель эксперимента состоит в сравнении параметров вырабатываемой электроэнергии при учете и без учета эффекта насыщения магнитопровода.

Исследование проводилось при вращающемся с номинальной частотой генераторе. Запуск осуществлялся без нагрузки. Параметры системы: Емкость конденсаторов возбуждения:  $C = 223 \text{ мкФ}$ ; сопротивление балластной нагрузки:  $R_6 = 54 \text{ Ом}$ ; вал генератора: вращается.

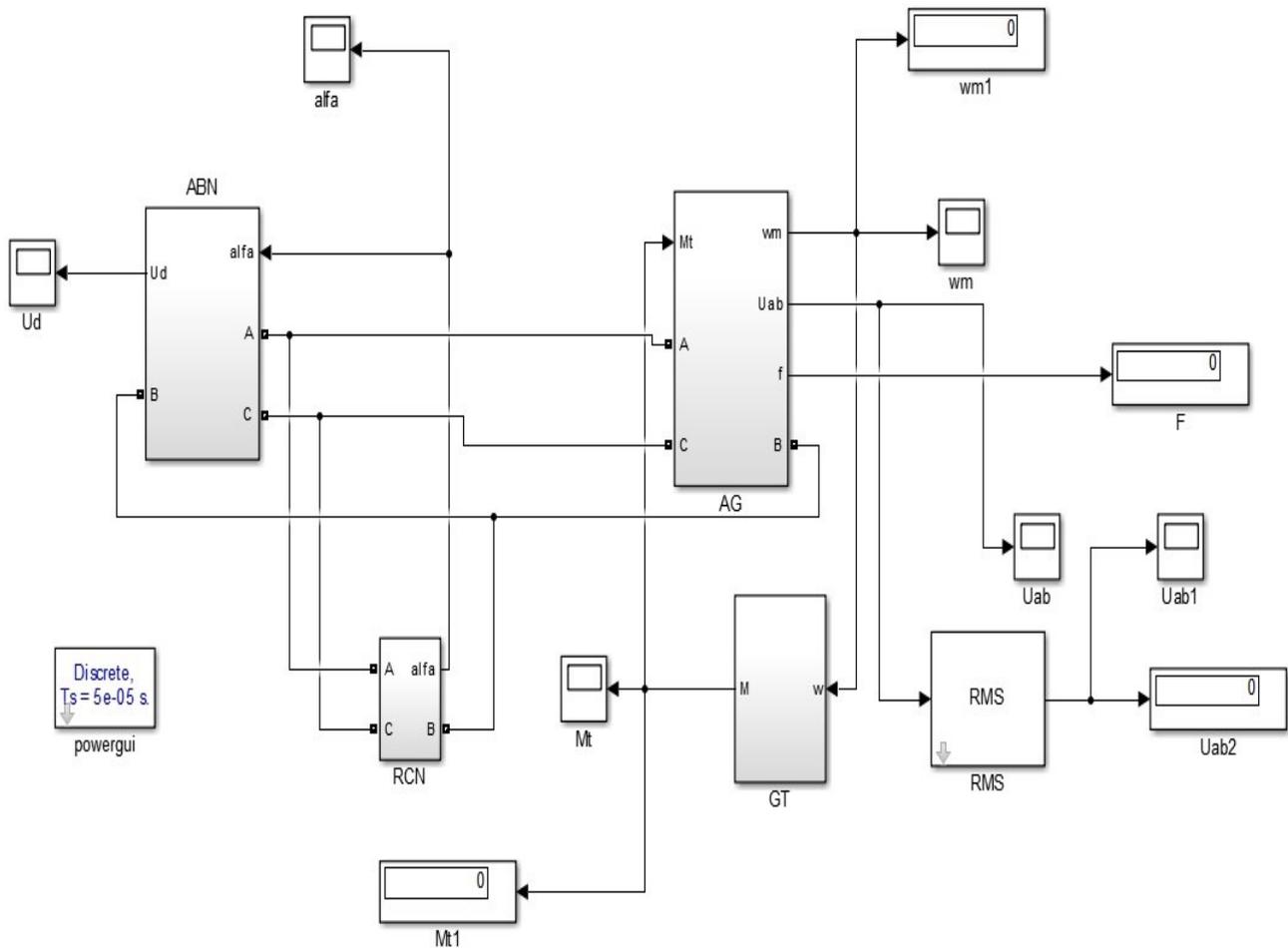


Рис. 8. Компьютерная модель микроГЭС с асинхронным генератором  
Fig. 8. Computer model of a micro HPP with an induction generator

#### Результаты эксперимента

Исследование процесса конденсаторного возбуждения АГ с учетом (рис. 9) и без учета (рис. 10) эффекта насыщения магнитопровода показало, что величина перенапряжения больше в случае, когда эффект насыщения не учитывается (800 В против 750 В). Однако величины линейного напряжения и частоты в установившемся режиме больше при учете насыщения (400 В против 370 В и 46 Гц против 37 Гц).

Установившийся режим наступает быстрее там, где насыщение учитывалось.

Из полученных данных можно сделать вывод, что игнорирование эффекта насыщения магнитопровода при моделировании может существенно отразиться на достоверности полученных результатов.

**Исследование запуска системы с последующим подключением нагрузки.** Цель эксперимента состоит в исследовании параметров вырабатываемой электроэнергии регулируемых балластной нагрузкой, в зависимости от мощности подключаемой нагрузки. Исследование проводилось при неподвижном в начальный момент времени валу генератора. Запуск осуществлялся без нагрузки. Потребитель электроэнергии подключался после того, как наступит установившийся режим. Параметры системы: емкость конденсаторов возбуждения:  $C = 223 \text{ мкФ}$ ; сопротивление балластной нагрузки:  $R_0 = 54 \text{ Ом}$ ; диапазон сопротивлений нагрузки:  $R_H = 144-16 \text{ Ом}$ ; вал генератора: неподвижен.

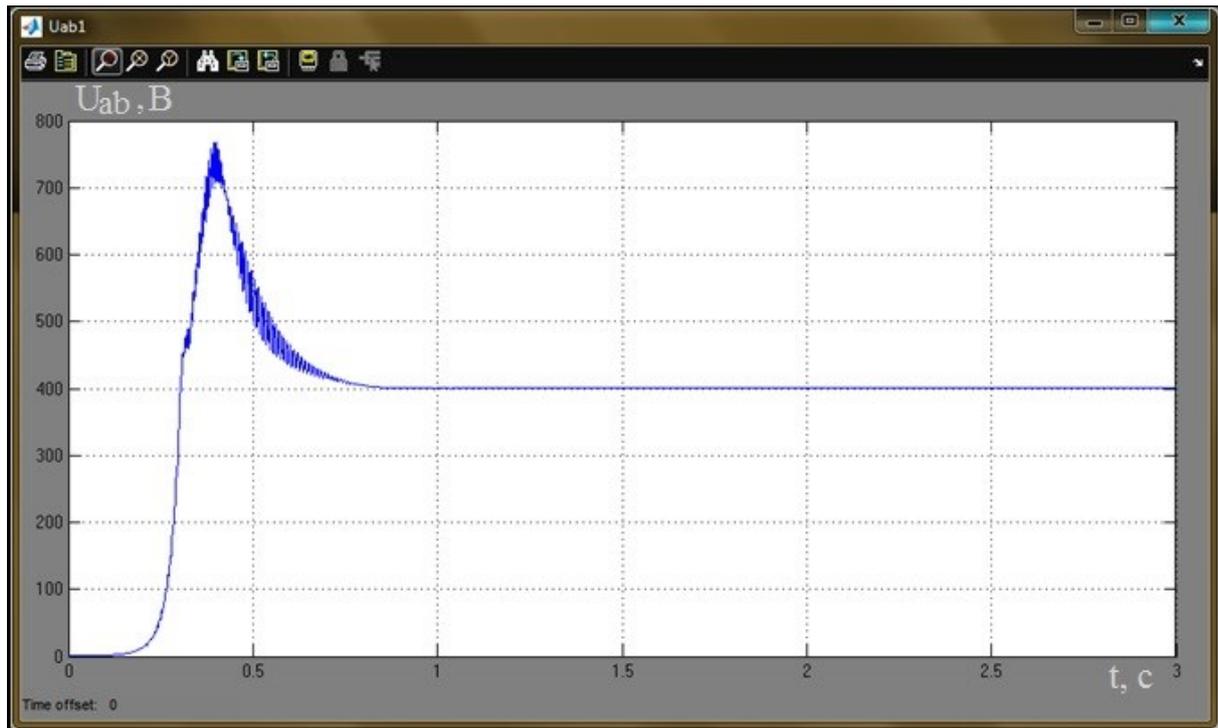


Рис. 9. Процесс конденсаторного возбуждения АГ с учетом эффекта насыщения магнитопровода  
Fig. 9. Induction generator capacitor excitation with allowance for the magnetic circuit saturation effect

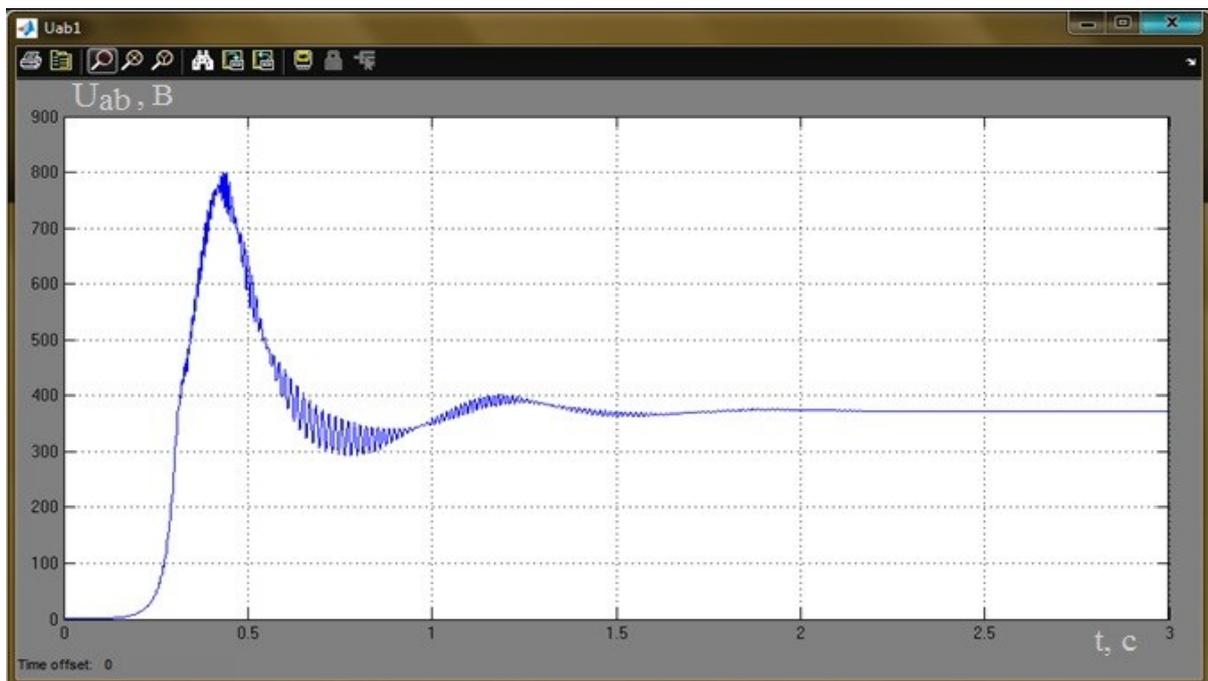


Рис. 10. Процесс конденсаторного возбуждения АГ без учета эффекта насыщения магнитопровода  
Fig. 10. Induction generator capacitor excitation with no allowance for the magnetic circuit saturation effect

#### Результаты экспериментов

Исследования качества генерируемой электроэнергии (табл. 1) показали, что при автобалластном регулировании при наличии нагрузки отклонение напряжения не превышает 4,5%, а частоты 1,8 Гц (рис. 11, рис. 12). При отсутствии нагрузки частота и напряжение равно номинальному.



Параметры вырабатываемой электроэнергии соответствуют нормам, следовательно, автобалластное регулирование выходных параметров справляется с поставленной задачей.

Таблица 1

**Отклонения частоты и напряжения от номинального значения**

Table 1

**Frequency and voltage deviations from the nominal value**

$P_n$ (Вт)	5000	10000	15000	20000	25000	30000	35000	40000	45000
$\Delta U_L$ %	-3,25	-3,5	-2,75	-1,75	-1,25	-0,75	-0,75	-1,5	-4,5
$\Delta f$ , Гц	-0,8	-0,5	0,5	0,8	1	1,8	1,6	0,7	-0,3

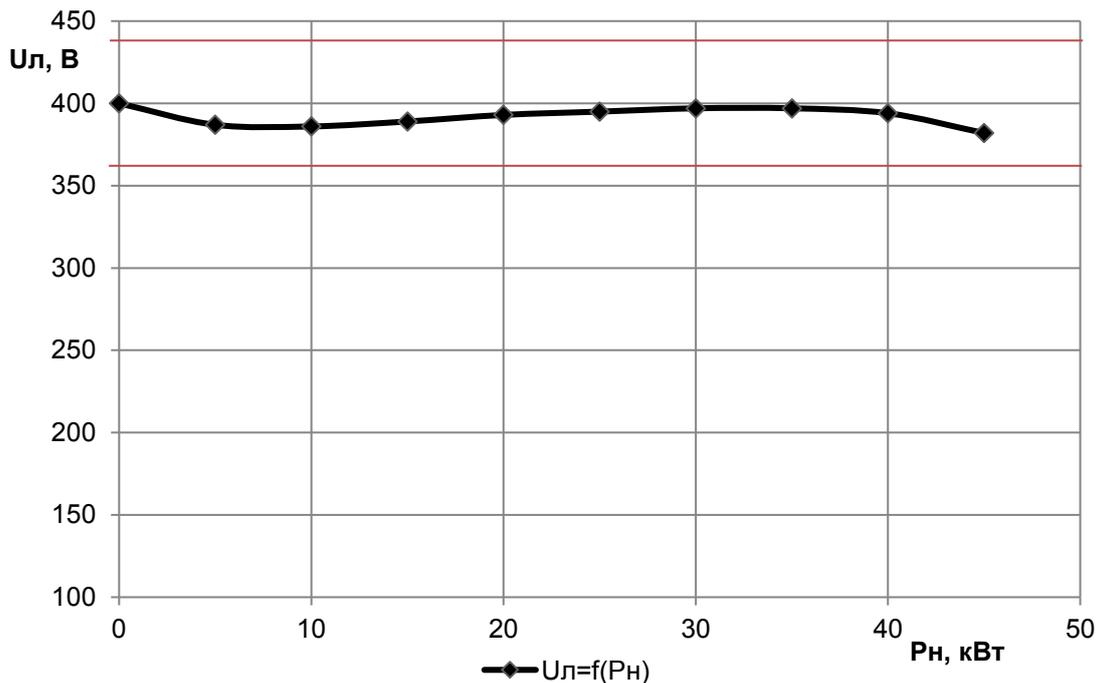


Рис. 11. Отклонение линейного напряжения  $U_L$  (В) от номинального значения (400 В) в зависимости от мощности нагрузки

Fig. 11. Line voltage deviation  $U_L$  (V) from the nominal value (400 V) depending on the load power

На рис. 13 представлена осциллограмма действующего значения линейного напряжения при запуске системы с последующим подключением нагрузки. В результате исследований установлено, что как и в предыдущем опыте в процессе самовозбуждения асинхронного генератора возникают кратковременные перенапряжения, максимальная величина которых достигает 750 В ( $1,75U_{ном}$ ) через 0,6 с после начала моделирования. Через 1,5 с после начала эксперимента к микроГЭС подключается нагрузка. В этот момент времени наблюдается «проседание» напряжения. Однако через небольшой промежуток времени его величина восстанавливается практически до первоначального значения.

**Исследование запуска системы под нагрузкой.** Цель эксперимента состоит в исследовании параметров вырабатываемой электроэнергии регулируемых балластной нагрузкой, в зависимости от мощности подключаемой нагрузки.

Исследование проводилось при неподвижном валу генератора. Запуск осуществлялся с подключенной нагрузкой. Параметры системы: емкость конденсаторов возбуждения  $C = 223$  мкФ; сопротивление балластной нагрузки  $R_b = 54$  Ом; диапазон сопротивлений нагрузки  $R_n = 144-16$  Ом; вал генератора неподвижен.

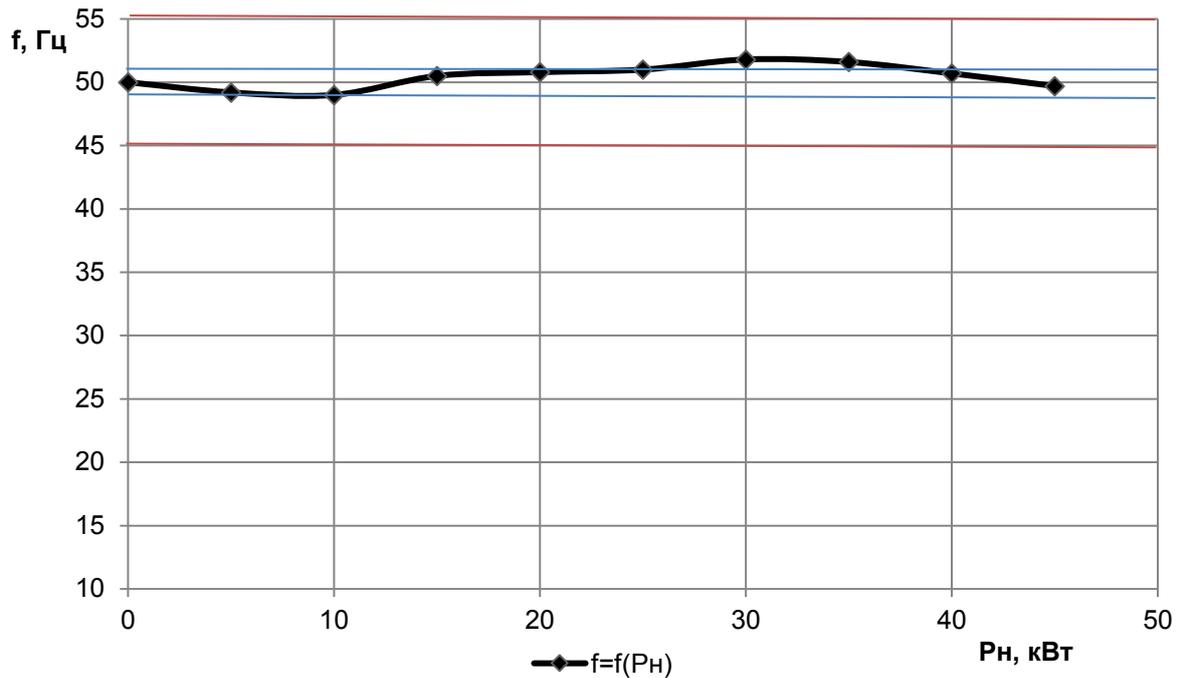


Рис. 12. Отклонения частоты на выходе генератора  $f$  (Гц) от номинального значения (50 Гц) в зависимости от мощности нагрузки

Fig. 12. Frequency deviation at the generator output  $f$  (Hz) from the nominal value (50 Hz) depending on the load power

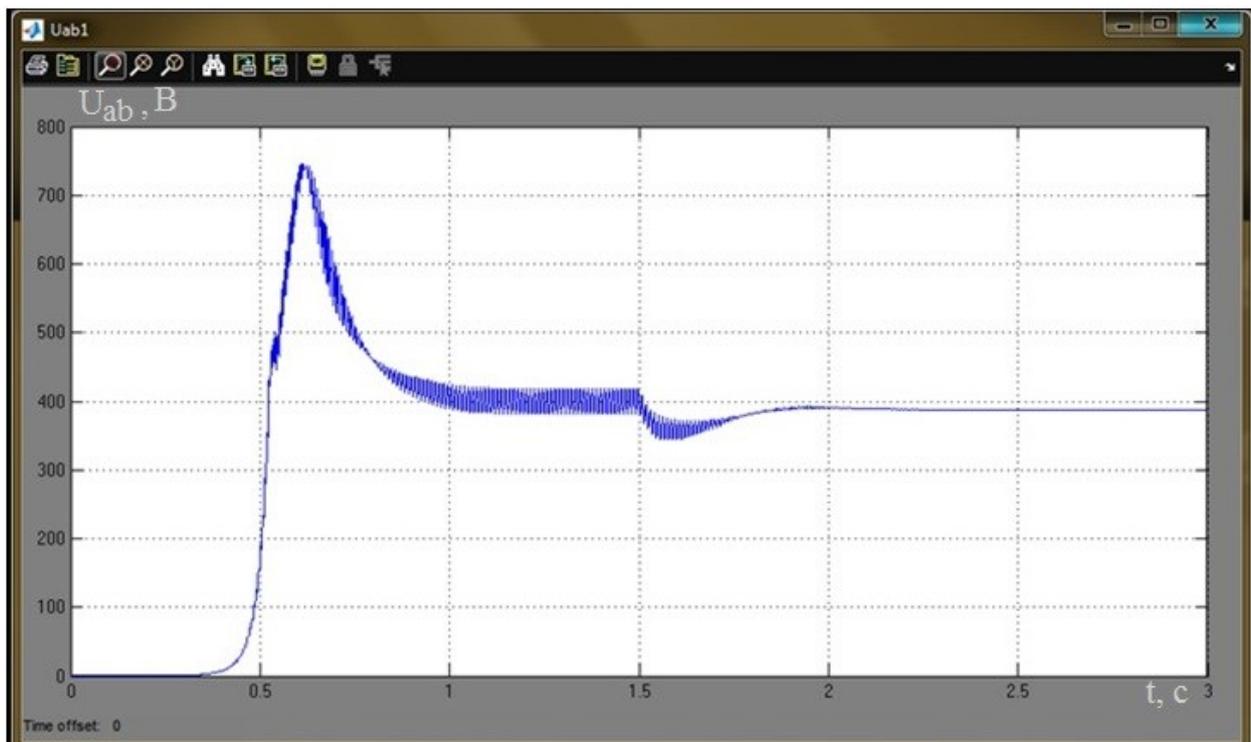


Рис. 13. Действующее значение линейного напряжения в процессе конденсаторного самовозбуждения с последующим подключением нагрузки

Fig. 13. Effective value of the line voltage under capacitor self-excitation with subsequent load connection

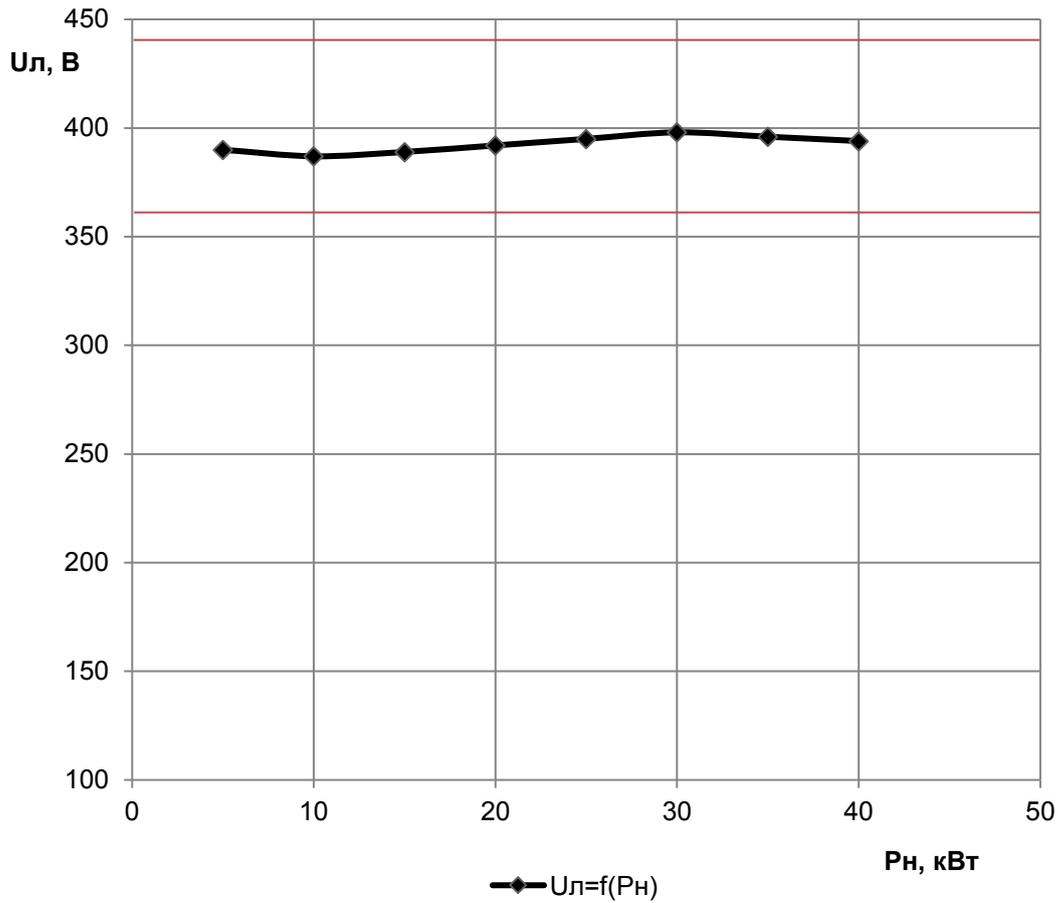


Рис. 14. Отклонения линейного напряжения  $\Delta U_L$  от номинального значения (400 В) в зависимости от мощности нагрузки

Fig. 14. Line voltage deviations  $\Delta U_L$  from the nominal value (400 V) depending on the load power

Результаты экспериментов

Исследования качества генерируемой электроэнергии показали, что отклонение напряжения не превышает 3,25%, а частоты – 1,6 Гц (табл. 2).

Таблица 2

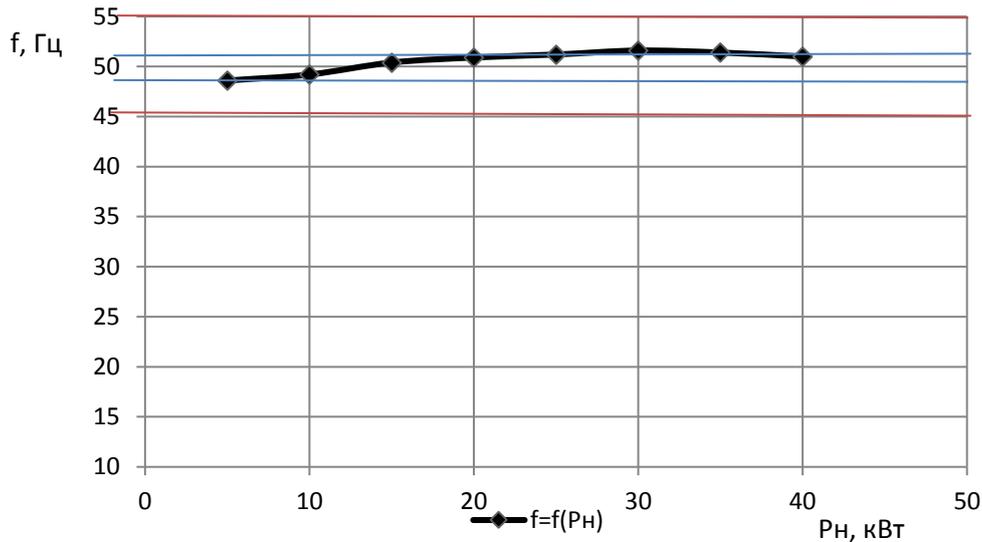
Отклонения частоты и напряжения от номинального значения в процентах

Table 2

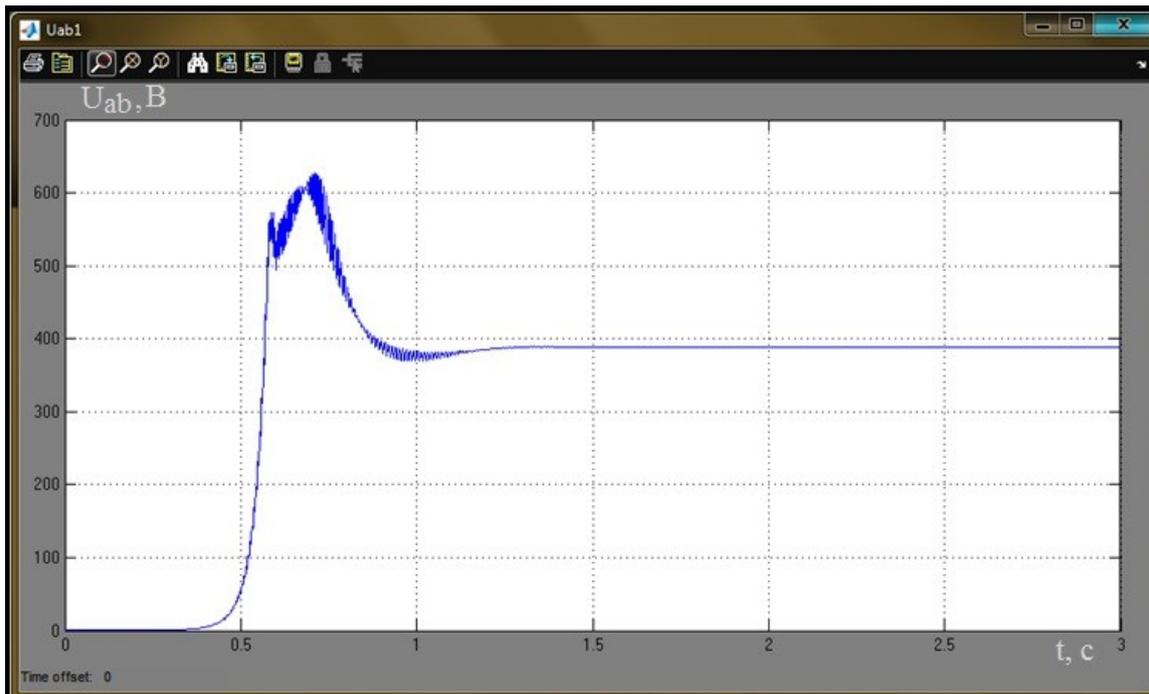
Frequency and voltage deviations from the nominal value in percent

$P_n$ (Вт)	5000	10000	15000	20000	25000	30000	35000	40000	45000
$\Delta U_L$ %	-2,5	-3,25	-2,75	-2	-1,25	-0,5	-1	-1,5	-
$\Delta f$ , Гц / Hz	-1,4	-0,8	0,4	0,9	1,2	1,6	1,4	1	-

Величина перенапряжения при увеличении мощности нагрузки ( $P_{наг}$ ) сначала снижается до  $1,4U_{ном}$  при  $P_{наг} = 0,5 P_{мах}$ . Однако при дальнейшем увеличении мощности возрастает до  $(2,125U_{ном})$ .



**Рис. 15. Отклонения частоты на выходе генератора  $\Delta f$  от номинального значения (50 Гц) в зависимости от мощности нагрузки**  
**Fig. 15. Frequency deviation at the generator output  $\Delta f$  from the nominal value (50 Hz) depending on the load power**



**Рис. 16. Действующее значение линейного напряжения в процессе конденсаторного самовозбуждения при запуске системы под нагрузкой**  
**Fig. 16. Effective value of the line voltage at capacitor self-excitation when starting a system under load**

Исследование процесса конденсаторного самовозбуждения асинхронного генератора с учетом характеристик системы стабилизации электроэнергии.

**Запуск системы с конденсатором возбуждения, емкость которого отличается от оптимальной.** Цель эксперимента состоит в том, чтобы исследовать процесс конденсаторного самовозбуждения при различной величине емкости конденсаторов. Работа схемы оценивается по характеристикам вырабатываемой электроэнергии.



Исследование проводилось при вращающемся с номинальной частотой генераторе. Запуск осуществлялся без нагрузки. Потребитель электроэнергии подключался после того, как наступит установившийся режим. Сопротивление нагрузки было выбрано таким, чтобы при оптимальной емкости конденсаторов возбуждения параметры вырабатываемой электроэнергии были:  $f = 50 \text{ Гц}$ ,  $U_n = 400 \text{ В}$ .

Емкость конденсаторов менялась в пределах от -30% до +30% от оптимального значения  $C = 223 \text{ мкФ}$ . Параметры системы: емкость конденсаторов возбуждения  $C = 156\text{--}290 \text{ мкФ}$ ; сопротивление балластной нагрузки  $R_b = 54 \text{ Ом}$ ; сопротивление нагрузки  $R_n = 96 \text{ Ом}$ ; вал генератора вращается.

#### Результаты экспериментов

Исследования качества генерируемой электроэнергии показали, что присутствуют значительные отклонения напряжения и частоты:  $\Delta U_n = 5\%$  и  $\Delta f = 19\%$  (табл. 3). Как видно из графиков (рис. 17, 18), частота и напряжение имеют практически линейную зависимость от емкости конденсаторов возбуждения. Чем больше емкость, тем ниже частота тока и линейное напряжение. При этом величина перенапряжения не зависит от емкости конденсаторов.

Таблица 3

Отклонения частоты и напряжения от номинального значения в процентах

Table 3

Frequency and voltage deviations from the nominal value in percent

C (мкФ)	156	178	201	223	245	268	290
$\Delta U_n \%$	3,75	2	0,45	0	-2	-3	-5
$\Delta f \%$	19	10	3,6	0	-3	-6,4	-10

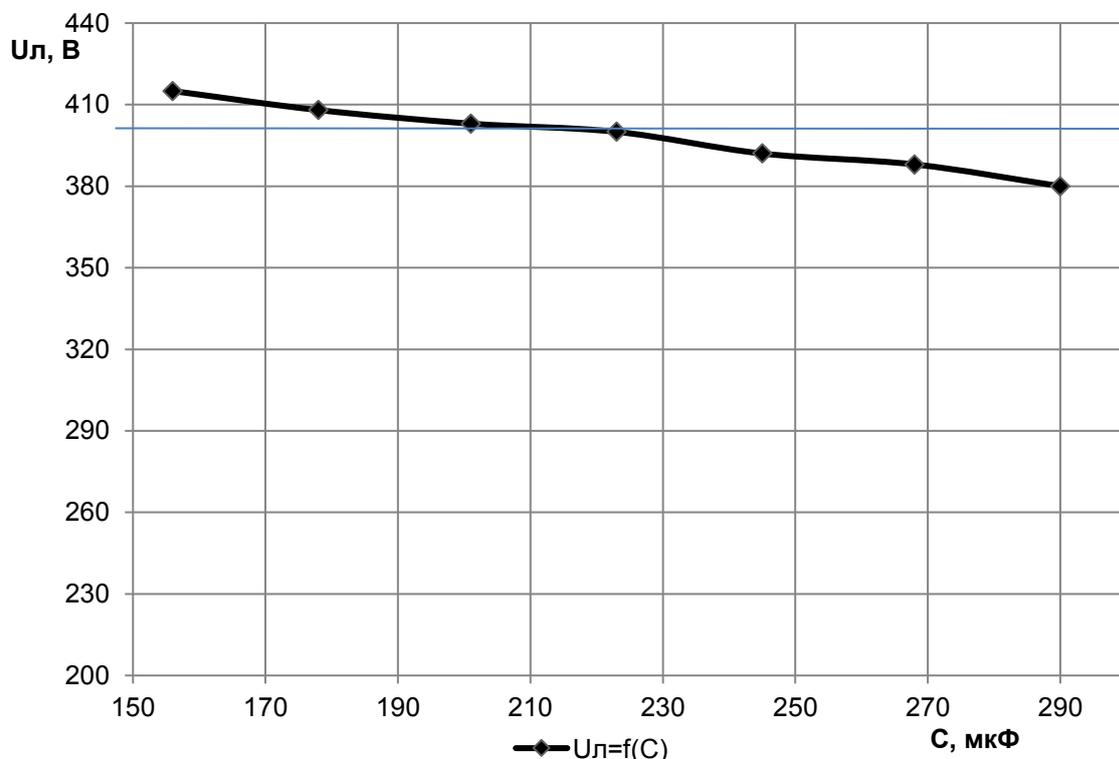


Рис. 17. Изменение величины линейного напряжения  $U_L$  (В) в зависимости от емкости конденсаторов

Fig. 17. Linear voltage  $U_L$  (V) value variation as a function of capacitor capacitance

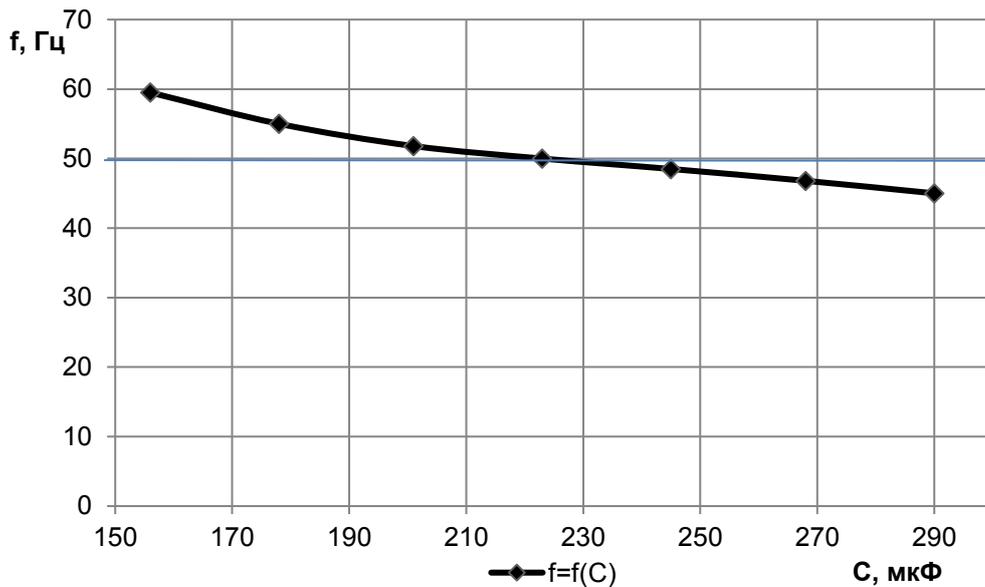


Рис. 18. Отклонения частоты на выходе генератора  $f$  (Гц) в зависимости от емкости конденсаторов

Fig. 18. Frequency deviations at the generator output  $f$  (Hz) depending on capacitor capacitance

На осциллограмме (рис. 19) видно, что величина перенапряжения не зависит от емкости конденсаторов.

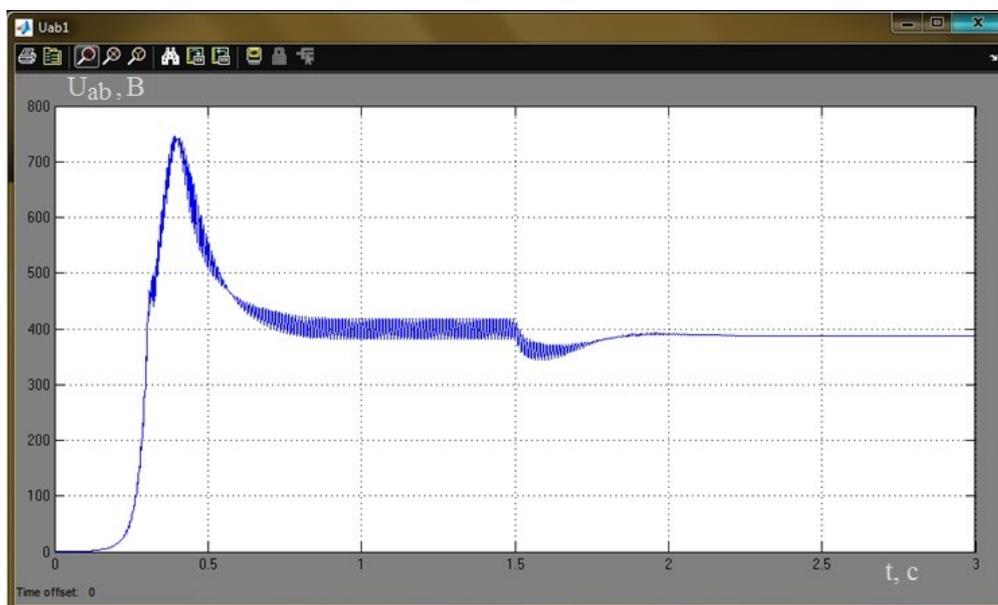


Рис. 19. Действующее значение линейного напряжения в процессе запуска системы с конденсатором возбуждения, емкость которого отличается от оптимальной

Fig. 19. Effective value of the line voltage when starting the system with an excitation capacitor whose capacitance differs from optimal

**Запуск системы с балластной нагрузкой, сопротивление которой отличается от оптимального значения.** Цель эксперимента состоит в том, чтобы исследовать работу системы при различной величине сопротивления автобалласта. Работа схемы оценивается по характеристикам вырабатываемой электроэнергии.



Исследование проводилось при вращающемся с номинальной частотой генераторе. Запуск осуществлялся без нагрузки. Потребитель электроэнергии подключался после того, как наступит установившийся режим. Сопротивление нагрузки было выбрано таким, чтобы при оптимальной емкости конденсаторов возбуждения и сопротивлении автобалласта параметры вырабатываемой электроэнергии были  $f = 50$  Гц,  $U_L = 400$  В. Сопротивление балластного резистора менялось в пределах от -30% до +30% от оптимального значения  $R_b = 54$  Ом. Параметры системы: емкость конденсаторов возбуждения  $C = 223$  мкФ; сопротивление балластной нагрузки  $R_b = 38-70$  Ом; сопротивление нагрузки  $R_H = 96$  Ом; вал генератора вращается.

*Результаты экспериментов*

Исследования качества генерируемой электроэнергии показали, что присутствуют значительные отклонения напряжения и частоты:  $\Delta U_L = 7\%$  и  $\Delta f \% = 17,4\%$  (табл. 4).

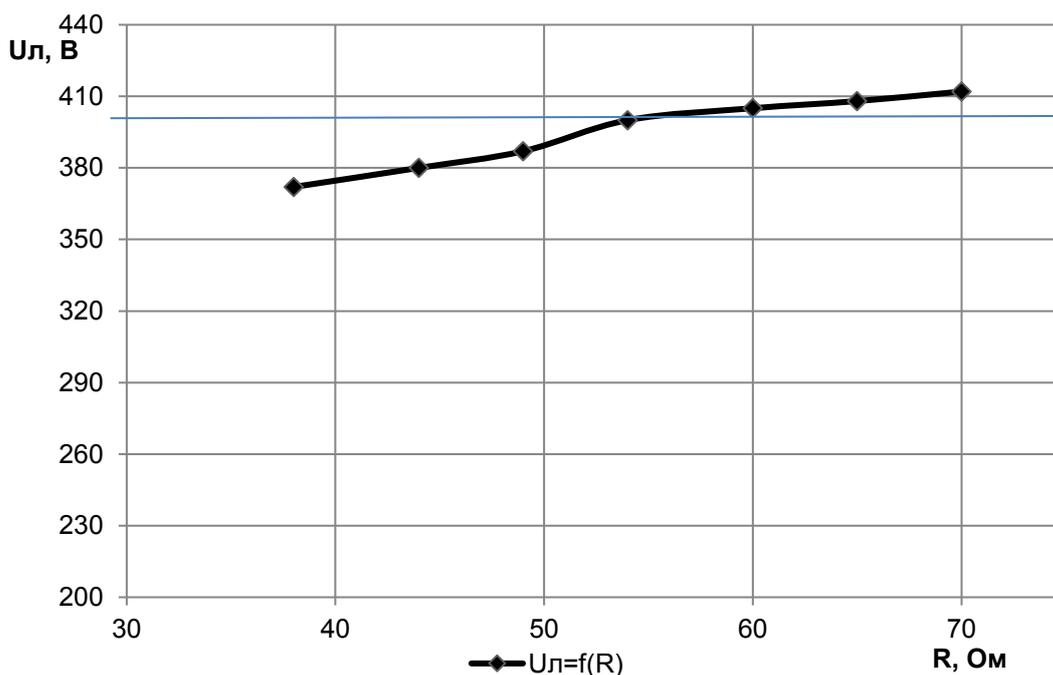
**Таблица 4**

**Отклонения частоты и напряжения от номинального значения в процентах**

**Table 4**

**Frequency and voltage deviations from the nominal value in percent**

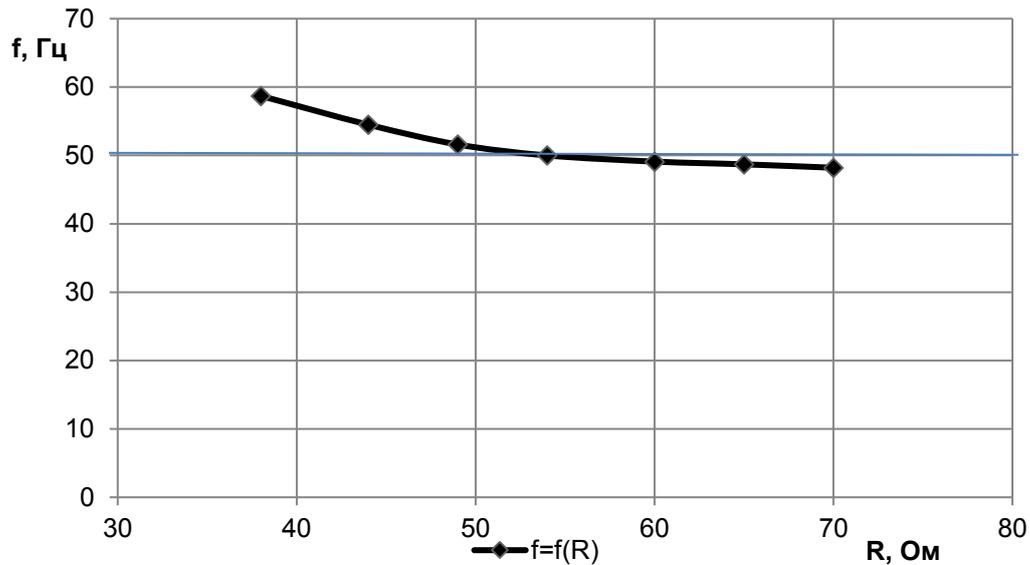
$R_b$ (Ом)	38	44	49	54	60	65	70
$\Delta U_L$ %	-7	-5	-3,25	0	1,25	2	3
$\Delta f$ %	17,4	9	3,2	0	-1,8	-2,6	-3,6



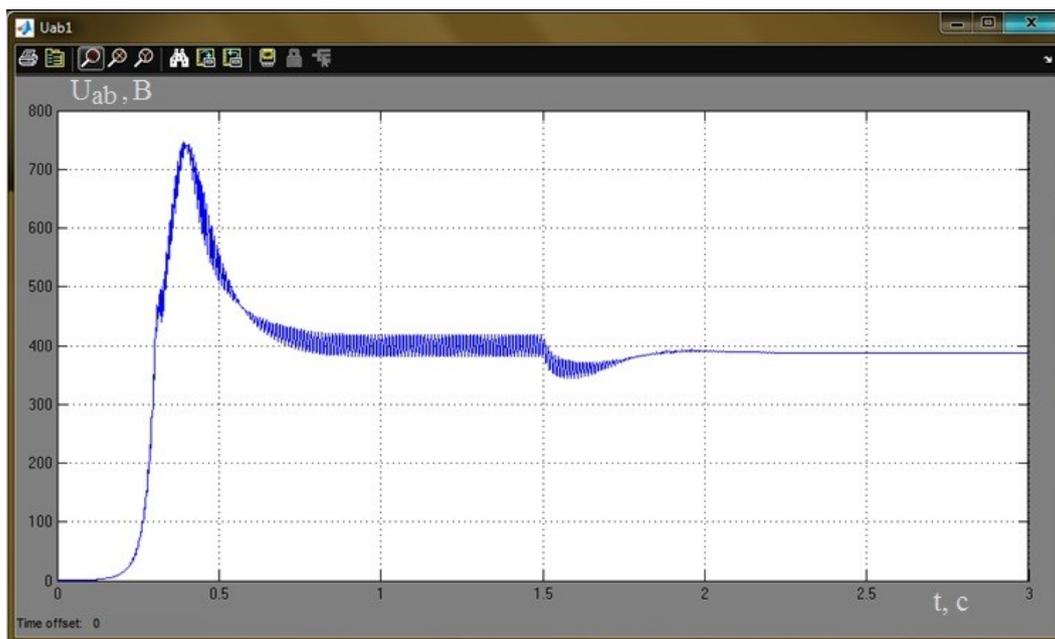
**Рис. 20. Отклонения линейного напряжения  $U_L$  от номинального значения (400 В) в зависимости от величины балластного сопротивления**

**Fig. 20. Line voltage deviations  $U_L$  from the nominal value (400 V) depending on the value of ballast resistance**

Как видно из графиков (рис. 20, 21), напряжение прямо пропорционально величине балластного сопротивления, а частота обратно пропорциональна ему. На осциллограмме (рис. 22) видно, что величина перенапряжения не зависит от величины сопротивления автобалласта.



**Рис. 21. Отклонения частоты на выходе генератора  $f$  (Гц) от номинального значения (50 Гц) в зависимости от величины балластного сопротивления**  
**Fig. 21. Frequency deviations at generator output  $f$  (Hz) from the nominal value (50 Hz) depending on the value of the ballast resistance**



**Рис. 22. Действующее значение линейного напряжения в процессе конденсаторного самовозбуждения при запуске системы с балластной нагрузкой, сопротивление которой отличается от оптимального значения**  
**Fig. 22. Effective value of the line voltage in the process of capacitor self-excitation at the start of a system with a ballast load, the resistance of which differs from the optimum value**

### Заключение

1. В результате исследования существующих функциональных схем электрооборудования выбрана оптимальная функциональная схема, состоящая из гидротурбины, асинхронного генератора, конденсаторов возбуждения, автобалластной нагрузки и блока нагрузки.



2. Разработана математическая модель микроГЭС. Проведенные исследования на которой показали, что она работает корректно и может применяться для проектирования микроГЭС для конкретных районов и нагрузок.

3. Разработаны компьютерные модели элементов оборудования микроГЭС, что позволило создать полную компьютерную модель всей системы микроГЭС и проводить на ней различные исследования.

4. Проведены исследования процесса конденсаторного самовозбуждения асинхронного генератора с учетом характеристик системы стабилизации электроэнергии, показавшие, что линейное напряжение и частота тока обратно пропорциональны величине емкости конденсаторов возбуждения. При варьировании же балластным сопротивлением система ведет себя по-другому. Напряжение изменяется прямо пропорционально величине балластного сопротивления, а частота – обратно пропорциональна. В качестве рекомендации следует предложить для улучшения стабилизации частоты проводить дополнительное регулирование емкости конденсаторов.

#### Библиографический список

1. Костырев М.Л., Джендубаев А-З.Р. Электрическая мощность серийного асинхронного двигателя при его использовании в качестве асинхронного генератора // *Электротехника*. 2008. № 7. С. 6–9.
2. Торопцев Н.Д. Асинхронные генераторы автономных систем. М.: Знак. 1997. 288 с. 3. Карелин В.Я., Волшаник В.В. Сооружение и оборудование малых гидроэлектростанций. М.: Энергоатомиздат, 1986. 199 с.
4. Лукутин Б.В., Обухов С.Г., Шандарова Е.Б. Автономное электроснабжение от микрогидроэлектростанций. Томск: STT, 2001. 120 с.
5. Потапов В.М., Ткаченко П.Е., Юшманов О.Л. Использование водной энергии. М.: Колос, 1972.
6. Пивоваров В.А. Проектирование и расчет систем регулирования гидротурбин Л.: Машиностроение, 1973. 273 с.
7. Костырев М.Л. Математическое моделирование в электротехнике. Самара: Самарский государственный технический университет. 2004. 94 с.
8. Костырев М.Л., Грачев П.Ю. Автономные вентильные генераторы и стартер-генераторы для автономных энергоустановок. М.: Энергоатомиздат, 2010. 199 с.
9. Прошкина И.П. Малые ГЭС – экологически чистый способ получения энергии // *Возобновляемая энергия*. 2002. № 1. С. 8–12.
10. Константинов Г.Г., Колуканов С.С. МикроГЭС с асинхронным генератором // *Повышение эффективности производства и использование электроэнергии в условиях Сибири: материалы Всерос. науч.-практ. конф. (Иркутск, 21–25 апреля 2015 г.)*. Иркутск, 2015. Т. 2. С. 309–314.
11. Лукутин Б.В., Обухов С.Г. Эквивалентная нагрузка генератора микрогидроэлектростанции с автобалластной нагрузкой // *Электромеханика*. 1988. № 5. С. 99–104.
12. Лукутин Б.В., Обухов С.Г. Микрогидроэлектростанция с автобалластной нагрузкой, регулируемой по частоте выходного напряжения // *Электромеханика*. 1990. № 6. С. 111–119.
13. Лукутин Б.В., Обухов С.Г., Шандарова Е.Б. Способы повышения качества выходного напряжения микрогидроэлектростанции с тиристорным автобалластом // *Промышленная энергетика*. 2000. № 8. С. 49–52.
14. Alp.Partnun, St.Antonien. МикроГЭС. Hassler Erwin, Elektrotechnik, Schweiz, 1985, 36. No. 12. P. 49–51.
15. Оборудование для малых ГЭС. *Int. Water Power and Dam Const.* 1986, 38. No. 4. С. 41–50.

#### References

1. Kostyrev M.L., Dzhendubaev A-Z.R. Electric power of the serial induction motor when it is used as an induction generator. *Elektrotehnika* [Electrical Engineering], 2008, no. 7, pp. 6–9. (In Russian).
2. Toropcev N.D. *Asinhronnye generatory avtonomnyh system* [Asynchronous generators of stand alone systems]. Moscow: Znak Publ., 1997, 288 p. (In Russian).
3. Karelin V.Ya., Volshanic V.V. *Sooruzhenie i oborudovanie malyh gidroelektrostantsij* [Construction and equipment of small hydroelectric power stations]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1986, 199 p. (In Russian).
4. Lukutin B.V., Obuhov S.G., Shandarova E.B. *Avtonomnoe elektrosnabzhenie ot mik-rogidroelektrostantsij* [Self-generated power supply from micro hydropower plants]. Tomsk: STT Publ., 2001, 120 p. (In Russian).
5. Potapov V.M., Tkachenko P.E., Yushmanov O.L. *Ispol'zovanie vodnoj energii* [Use of water energy]. Moscow: Kolos Publ., 1972. (In Russian).
6. Pivovarov V.A. *Proektirovanie i raschet sistem regulirovaniya gidroturbin* [Design and calculation of hydraulic turbine control systems]. Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1973, 273 p. (In Russian).



7. Kostyrev M.L. *Matematicheskoe modelirovanie v elektrotehnike* [Mathematical modeling in electrical engineering]. Samara: Samara State Technical University Publ., 2004, 94 p. (In Russian).
8. Kostyrev M.L., Grachev P.Yu. *Avtonomnye ventil'nye generatory i starter-generatory dlya avtonomnyh energoustanovok* [Stand alone valve generators and starter generators for self-generating power plants]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 2010, 199 p. (In Russian).
9. Proshkina I.P. Small hydropower stations as an environmentally friendly method of energy generation. *Vozobnovlyаемая энергия* [Renewable Energy], 2002, no. 1, pp. 8–12. (In Russian).
10. Konstantinov G.G., Kolukanov S.S. *MikroGES s asinhronnym generatorom* [Micro HPP with an induction generator]. *Materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovanie elektroenergii v usloviyah Sibiri"* [Proceedings of All-Russian scientific and practical conference "Increasing efficiency of electric power production and use in Siberia", Irkutsk, 21–25 April 2015]. Irkutsk, 2015, vol. 2, pp. 309–314. (In Russian).
11. Lukutin B.V., Obuhov S.G. Equivalent load of microhydroelectric power station generator with an autoballast load. *Elektromekhanika* [Electromechanics], 1988, no. 5, pp. 99–104. (In Russian).
12. Lukutin B.V., Obuhov S.G. Microhydroelectric power station with autoballast load regulated by output voltage frequency. *Elektromekhanika* [Electromechanics], 1990, no. 6, pp. 111–119. (In Russian).
13. Lukutin B.V., Obuhov S.G. Methods to improve output voltage quality of a microhydroelectric power station with a thyristor autoballast. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Power Engineering], 2000, no. 8, pp. 49–52. (In Russian).
14. Alp.Partnun, St.Antonien. MikroGES. Hassler Erwin, Elektrotechnik, Schweiz, 1985, 36, no. 12, pp. 49–51.
15. *Oborudovanie dlya malyh GES* [Equipment for small hydropower plants]. Int. Water Power and Dam Const. 1986, 38, no. 4, pp. 41–50.

#### Критерии авторства

Константинов Г.Г. предложил оптимальную функциональную схему микроГЭС, состоящую из гидротурбины, асинхронного генератора, конденсаторов возбуждения, автобалластной нагрузки и блока нагрузки, а также математическую модель микроГЭС, подготовил рукопись. Несет ответственность за плагиат. Майоров Г.С. разработал компьютерные модели элементов оборудования микроГЭС, провел на них исследования процесса конденсаторного самовозбуждения асинхронного генератора с учетом характеристик системы стабилизации электроэнергии, проанализировал полученные результаты. Автор несет ответственность за плагиат.

#### Authorship criteria

Konstantinov G.G. proposed an optimal functional diagram of a micro hydroelectric power station consisting of a hydraulic turbine, an induction generator, excitation capacitors, an autoballast load and a load block, as well as a mathematical model of a micro hydroelectric power station. He prepared the manuscript for publication and bears the responsibility for plagiarism. Maiorov G.S. developed computer models of micro-hydroelectric power plant equipment elements, studied the process of capacitor self-excitation of the induction generator taking into account the characteristics of the electric power stabilization system and analyzed the obtained results. He bears the responsibility for plagiarism.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.



Оригинальная статья / Original article  
УДК 621.316.925+621.318.5 (045)  
DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-10-117-128>

## ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ РАБОТЕ ФИЛЬТРОВ ФУРЬЕ В УСТРОЙСТВАХ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

© Р.В. Солопов<sup>1</sup>, В.С. Ковженкин<sup>2</sup>, Л.В. Вайтеленко<sup>3</sup>

Филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
214013, Российская Федерация, г. Смоленск, Энергетический проезд, 1.

**РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ.** Надежность работы электроэнергетических систем напрямую зависит от правильности функционирования устройств релейной защиты. Для современного этапа развития техники данных устройств при вычислении информационных параметров характерно применение различных алгоритмов цифровой фильтрации сигналов, в том числе и фильтров Фурье. Поэтому исследование погрешностей фильтрации, возникающих при влиянии различных факторов (частоты дискретизации, наличия в сигнале аперiodической, гармонических и негармонических составляющих) и изменении частоты входного сигнала, является актуальным для обеспечения требуемой надежности работы микропроцессорной релейной защиты, особенно с учетом необходимости повышения частоты дискретизации с введением протокола передачи данных МЭК-61850-9-2. **МЕТОДЫ.** Исследование проведено с использованием методов цифровой обработки сигналов и математического моделирования работы фильтров. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** В результате проведенного анализа амплитудно-частотных характеристик фильтров выявлена предельно минимальная частота дискретизации сигнала. Получена численная оценка погрешности фильтрации при различных воздействующих факторах, позволяющая определить необходимость использования предварительной фильтрации. **ВЫВОДЫ.** Обеспечение надежной работы устройств релейной защиты с использованием фильтров Фурье возможно с применением специальных мер по устранению выявленных погрешностей.

**Ключевые слова:** релейная защита, цифровая обработка сигналов, дискретное преобразование Фурье, ортогональные составляющие, аперiodическая составляющая, синусный и косинусный фильтры.

**Информация о статье.** Дата поступления 22 августа 2018 г.; дата принятия к печати 19 сентября 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 октября 2018 г.

**Формат цитирования.** Солопов Р.В., Ковженкин В.С., Вайтеленко Л.В. Оценка погрешностей при работе фильтров Фурье в устройствах релейной защиты // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 10. С. 117–128. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-117-128

### ERROR ESTIMATION UNDER FOURIER FILTER OPERATION IN PROTECTIVE RELAYS

R.V. Solopov, V.S. Kovzhenkin, L.V. Vaitelenok

Smolensk branch of National Research University "Moscow Power Engineering Institute",  
1, Energeticheskii Proezd, Smolensk, 214013, Russian Federation

<sup>1</sup>Солопов Роман Вячеславович, кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетических систем, e-mail: [solopov.rv@mail.ru](mailto:solopov.rv@mail.ru)

Roman V. Solopov, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Power Systems, e-mail: [solopov.rv@mail.ru](mailto:solopov.rv@mail.ru)

<sup>2</sup>Ковженкин Виктор Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетических систем, e-mail: [jiklemjiklem4@gmail.com](mailto:jiklemjiklem4@gmail.com)

Viktor S. Kovzhenkin, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Power Systems, e-mail: [jiklemjiklem4@gmail.com](mailto:jiklemjiklem4@gmail.com)

<sup>3</sup>Вайтеленко Лариса Витальевна, ассистент кафедры электроэнергетических систем, e-mail: [larisa.vaytelenok.786@mail.ru](mailto:larisa.vaytelenok.786@mail.ru)

Larisa V. Vaytelenok, Assistant Professor of the Department of Electrical Power Systems, email: [larisa.vaytelenok.786@mail.ru](mailto:larisa.vaytelenok.786@mail.ru)



**ABSTRACT. PURPOSE.** The operation reliability of electric power systems is strongly dependent on the correct operation of relay protection devices. The modern technological stage of these devices is characterized by the application of various algorithms of digital signal filtering including Fourier filters for information parameter calculation. Therefore, the study of filtration errors arising under the effect of various factors including the sampling frequency, the presence of aperiodic, harmonic and non-harmonic components in the signal and variation of the input signal frequency is relevant in terms of ensuring the required reliability of microprocessor protective relays, especially given the need to improve the sampling frequency with the introduction of the IEC data transfer Protocol-61850-9-2. **METHODS.** The research employs the methods of digital signal processing and mathematical modeling of filter operation. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The conducted analysis of amplitude-frequency characteristics of filters has allowed to identify an extremely minimal sampling frequency of the signal. The received numerical estimation of filtration error at various influencing factors demonstrates the necessity of preliminary filtration. **CONCLUSIONS.** Reliable operation of relay protection devices using Fourier filters can be ensured through the use of special measures enabling the elimination of the revealed errors.

**Keywords:** relay protection, digital signal processing, discrete Fourier transform, orthogonal components, aperiodic component, sine and cosine filters

**Information about the article.** Received August 22, 2018; accepted for publication September 19, 2018; available online October 31, 2018.

**For citation.** Solopov R.V., Kovzhenkin V.S., Vaitelenok L.V. Error estimation under Fourier filter operation in protective relays. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 10, pp. 117–128. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-117-128. (In Russian)

## Введение

Микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматики (МУ РЗА) являются одними из наиболее важных элементов, обеспечивающих правильное функционирование энергосистем. Данные устройства позволяют выявить и отделить поврежденный элемент, тем самым уменьшив масштабы разрушений и повреждений [1]. В качестве признака наличия аварийной ситуации, как правило, используется изменение величины информационного параметра (тока и/или напряжения) по сравнению с заданным значением (уставкой). Так как МУ анализируют информацию в цифровом виде, а на входы МУ поступают аналоговые сигналы от трансформаторов тока и напряжения, то уже на стадии обработки сигналов начинает появляться погрешность, которая может оказывать существенное влияние на работу РЗ.

Обработка сигналов может быть произведена различными методами [2, 3]. В практике релейной защиты для выделения информационных параметров из входных сигналов широкое применение нашли частотные рекурсивные фильтры Фурье [4–6]. Работа данных фильтров основана на свойстве дискретного преобразования Фурье (ДПФ) выделять амплитудное значе-

ние  $X$  составляющей частоты анализа  $f_{анл}$  по отсчетам входного сигнала  $x(nT)$  (где  $n$  – номер отсчета,  $T = 1/f$  – период дискретизации сигнала, обратно пропорциональный частоте дискретизации  $f$ ). Для большинства устройств РЗ такой частотой анализа является промышленная частота  $f_0 = 50$  Гц.

Как правило, используются два взаимосвязанных фильтра: синусный и косинусный. Первый из них работает на основе следующего выражения:

$$X_s(nT) = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(nT) \cdot \sin(\omega_0 nT),$$

то есть значение сигнала на выходе данного фильтра равняется синусной составляющей  $X_s(nT)$  сигнала 50 Гц при числе выборок за период промышленной частоты  $N = T_0 / T$  и  $\omega_0 = 2\pi f_0$ .

Фильтр, выделяющий косинусную составляющую, функционирует по выражению:

$$X_c(nT) = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(nT) \cdot \cos(\omega_0 nT).$$



Далее, по полученным сигналам рассчитываются необходимые для работы защиты величины амплитуды (модуля)  $|X|$  и фазы  $\varphi$  сигнала [2]:

$$|X| = \sqrt{X_c^2(nT) + X_s^2(nT)};$$

$$\varphi = \arctg \frac{X_c(nT)}{X_s(nT)}.$$

Если в исследуемом сигнале содержится составляющая только основной гармоники, то данные фильтры позволяют получить первый выходной сигнал без погрешности уже через 0,02 с (периодичность появления последующих отсчетов выходных сигналов равна  $T$ ), что вполне удовлетворяет требованиям быстродействия современных устройств защиты [7].

Однако входные сигналы устройств РЗ чаще всего содержат и другие составляющие, такие как:

– свободные апериодические  $x_a(nT)$ , возникающие при коммутациях или при коротких замыканиях (КЗ) в энергосистеме из-за наличия индуктивностей применяемого оборудования (линий, трансформаторов);

– свободные колебательные  $x_{os}(nT)$ , обусловленные переходными процессами, возникающими в емкостных трансформаторах напряжения при скачкообразном падении напряжения в энергосистеме;

– негармонические  $x_{ng}(nT)$ , причинами появления которых могут быть изменения амплитуд и углов фаз напряжения (при модуляции токов и напряжения) или асинхронное переключение полупроводниковых

устройств статических преобразователей;

– гармонические  $x_g(nT)$ , обусловленные наличием оборудования с нелинейной вольт-амперной характеристикой.

Данные составляющие в практике релейной защиты рассматриваются как помехи по отношению к полезному сигналу, и должны исключаться на стадии обработки сигналов [8]. Однако ввиду особенностей частотных свойств вышеназванных фильтров некоторые помехи не могут быть полностью исключены и вносят в выходной сигнал значительную погрешность, что может повлиять на результат работы устройства защиты. Причем могут быть как излишние срабатывания, например, если погрешность положительная и выходной сигнал больше уставки, так и замедленное срабатывание, если в начале переходного процесса имеется отрицательная погрешность, то есть занижение величины информационного процесса. Таким образом, исследование частотных свойств данных фильтров и оценка их погрешности при различных сигналах необходимы для обеспечения правильного функционирования устройств релейной защиты.

Помимо этого, данная задача является особенно актуальной в условиях перехода на устройства, поддерживающие протокол передачи данных МЭК-61850-9-2, который требует использовать частоту дискретизации равную 4000 Гц, что соответствует 80 выборкам за период [9]. Согласно функциональным формулам фильтров, их выходной сигнал зависит от частоты дискретизации, и частотные свойства могут значительно измениться. Поэтому в работе будет рассмотрено влияние различных помех на частотные свойства фильтров также и с учетом вариации частоты дискретизации.

### Частотные характеристики фильтров Фурье при стационарных сигналах

Выражения для построения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) фильтров получаются путем z-преобразований их передаточных функций [10] и равны:

$$H_s(\omega) = \left| \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \sin(\omega_0 T [N-1-k]) \cdot e^{-jq \cdot k \cdot \frac{2\pi}{N}} \right|;$$
$$H_c(\omega) = \left| \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \cos(\omega_0 T [N-1-k]) \cdot e^{-jq \cdot k \cdot \frac{2\pi}{N}} \right|,$$



где  $k$  – номер текущей выборки;  $q = \omega / \omega_0$  – номер гармоники;  $N$  – число выборок за период.

На рис. 1 представлены АЧХ синусного  $H_s(\omega)$  и косинусного  $H_c(\omega)$  фильтров Фурье, построенные для трех значений  $N$ : 12, 20 и 80. Для всех данных значений АЧХ при частоте 50 Гц (первая гармоника) равняется единице, то есть на частоте анализа  $f_{anl}$  сигнал преобразуется без погрешности. Для  $N = 20$  и  $N = 80$  при всех остальных целых значениях  $q$  коэффициент передачи сигнала равен нулю, то есть данные фильтры исключают кратные гармонические составляющие из входного сигнала. При  $N = 12$  для одиннадцатой гармоники коэффициент передачи равен 1, таким образом,

при наличии во входном сигнале составляющей данной гармоники требуется применение предварительной аналоговой фильтрации.

Для нецелых значений  $q$  коэффициент передачи отличен от нуля, причем его величина растет при уменьшении значения параметра  $N$ .

Таким образом, при использовании фильтров Фурье для нахождения параметров сигнала промышленной частоты без применения дополнительных средств аналоговой фильтрации следует использовать частоту дискретизации не менее 1000 Гц. Повышение частоты дискретизации до 4000 Гц позволяет уменьшить погрешность, вносимую составляющими нецелых гармоник, но не устраняет ее полностью.

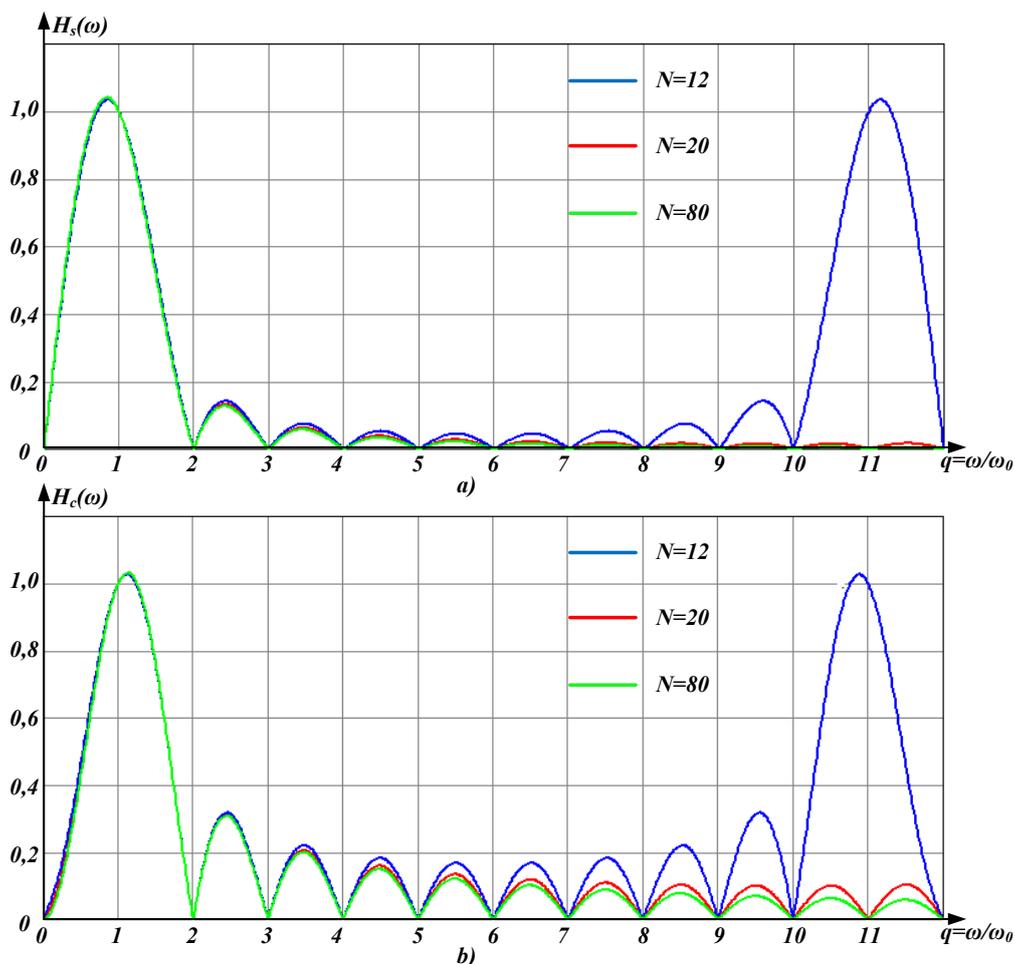


Рис. 1. Амплитудно-частотные характеристики синусного (а) и косинусного (б) фильтров для  $N = 12, 20, 80$

Fig. 1. Amplitude-frequency characteristics of sine (a) and cosine (b) filters for  $N = 12, 20, 80$

## Оценка погрешностей фильтров Фурье при изменении основной частоты

Исходя из представленных АЧХ, передавать сигнал основной частоты без погрешности данные фильтры будут только при частоте первой гармоники, равной частоте анализа, т.е. 50 Гц. Однако в электроэнергетической системе возможны отклонения данного параметра, причем в аварийных режимах это отклонение носит существенный характер [11]. В таком случае при фильтрации будет наблюдаться так называемое явление утечки, а результаты будут представлять собой только аппроксимацию истинного спектра сигнала [12]. Это обусловлено, прежде всего, тем, что на  $N$  отсчетов сигнала будет приходиться нецелый период сигнала (как для случая с промышленной частотой) [13, 14]. Поэтому при рассмотрении классических фильтров Фурье важной задачей является исследование влияния изменения частоты сети на точность обработки сигналов.

Для решения данной задачи было рассчитано ДПФ по частоте 50 Гц при подаче на вход  $N = 20$  отсчетов (один период) синусоиды единичной амплитуды, с нулевой

фазой при вариации частоты от 40 Гц до 55 Гц. Данный диапазон частот выбран не столько из реально возможного отклонения в действующей энергосистеме, а по среднему из диапазонов гарантированных измерений, указанных большинством российских производителей в руководствах по эксплуатации терминалов защиты. Результаты расчетов синусной  $X_S$ , косинусной  $X_C$  и модульной  $|X|$  составляющей и угла  $\varphi$  представлены на рис. 2.

Анализируя графики, представленные на рис. 2, можно сделать следующие выводы:

– значение синусоидальной составляющей при частотах  $f < 48,3$  Гц и  $f > 50$  Гц меньше истинного единичного значения (погрешность отрицательная, при 40 Гц  $\delta_{\min} = -16,2\%$ ); для частот от 48,3 до 50 Гц погрешность положительна (при  $f = 48,3$  Гц  $\delta_{\max} = 0,9\%$ );

– для значения косинусоидальной составляющей и угла наблюдается прямопропорциональная зависимость от частоты;

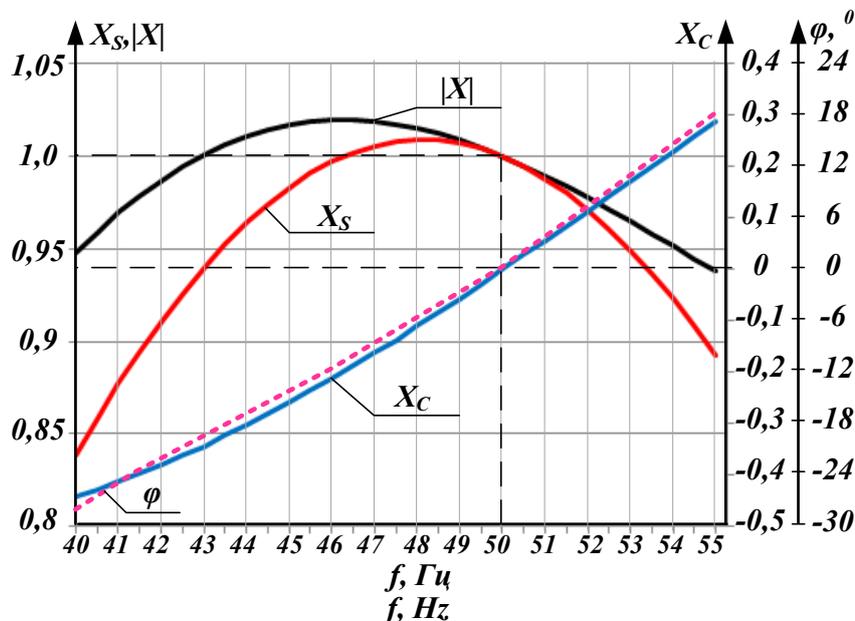


Рис. 2. Зависимости синусной, косинусной и модульной составляющих и угла от значения частоты входного сигнала

Fig. 2. Dependences of the sine, cosine and modular components and the angle on the input signal frequency value



– зависимость амплитуды практически повторяет зависимость синусоидальной составляющей; при вариации частоты в пределах  $\pm 0,5$  Гц относительная погрешность не превышает 0,5 %. Максимальная погрешность соответствует частоте 55 Гц и составляет 6,2%, т.е. при данных условиях возможно ложное несрабатывание устройства защиты, даже если входной сигнал больше уставки.

Для определения зависимости погрешности при вариации частоты от используемого числа выборок  $N$  рассчитано также ДПФ при числе выборок  $N = 48$  (используется в некоторых современных терминалах РЗиА) и  $N = 80$  (согласно МЭК 61850-9-2). Максимальная погрешность также соответствует частоте 55 Гц, но можно отметить небольшое снижение ее значения до  $\delta = 5,77\%$  для  $N = 48$  и  $\delta = 5,62\%$  для  $N = 80$  (рис. 3). В диапазоне частот 48,3–52 Гц погрешности вычисления модуля практически равны для всех значений  $N$ . В то же время при частотах 42,5–48,3 Гц погрешность вычислений при  $N = 20$  меньше в среднем на 0,7%, а при более низких частотах, наоборот, больше в среднем на 1,0%.

Данные исследования были проведены для  $N$  выборок сигнала с частотой  $f \neq 50$  Гц. Рассмотрим для примера, как изменяется погрешность вычислений при условии, что сначала на вход фильтров подавался сигнал с частотой  $f = 50$  Гц, а затем в момент времени  $nT = 0,02$  с частота повысилась скачкообразно на 0,1 Гц. Результаты расчетов представим в виде графиков на рис. 4.

Отклонения синусоидальной  $\Delta X_S$  и косинусоидальной  $\Delta X_C$  составляющих от соответствующих им значений при 50 Гц носят характер нарастающих по амплитуде колебаний (рис. 4 а) и не имеют установившегося значения даже по истечении пяти периодов с момента изменения частоты. Относительная погрешность вычисления модуля сигнала  $\delta_{|x|}$  имеет характер незатухающих гармонических колебаний с момента времени  $nT = 0,039$  с (рис. 4 б), то есть когда среди выборок в фильтрах не осталось выборок частоты 50 Гц. Период колебаний не зависит от числа используемых выборок и составляет 0,01 с. Максимальная погрешность ( $\delta_{|x|} = 0,26\%$ ) возникает в момент времени 0,034 с (через время  $nT = 0,014$  с после изменения частоты).

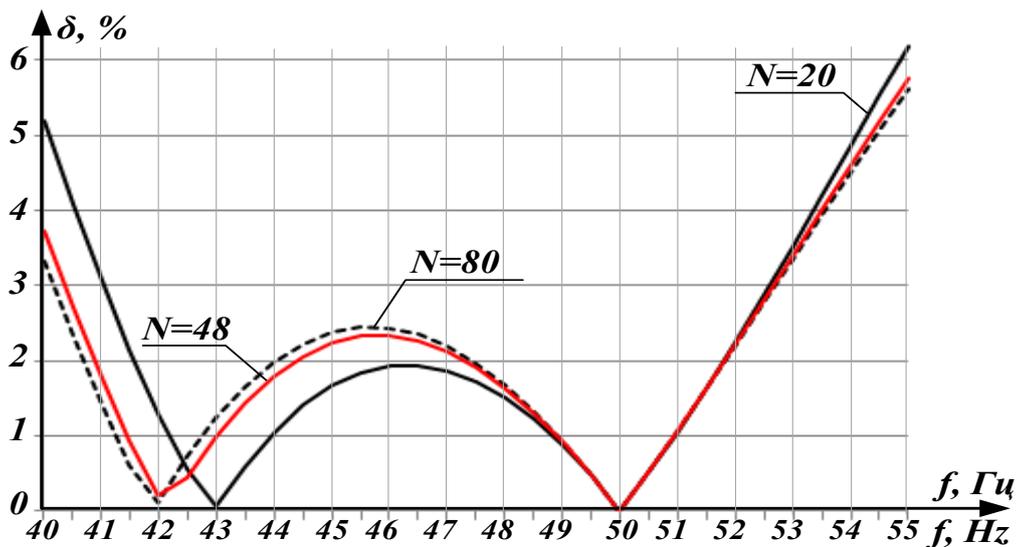
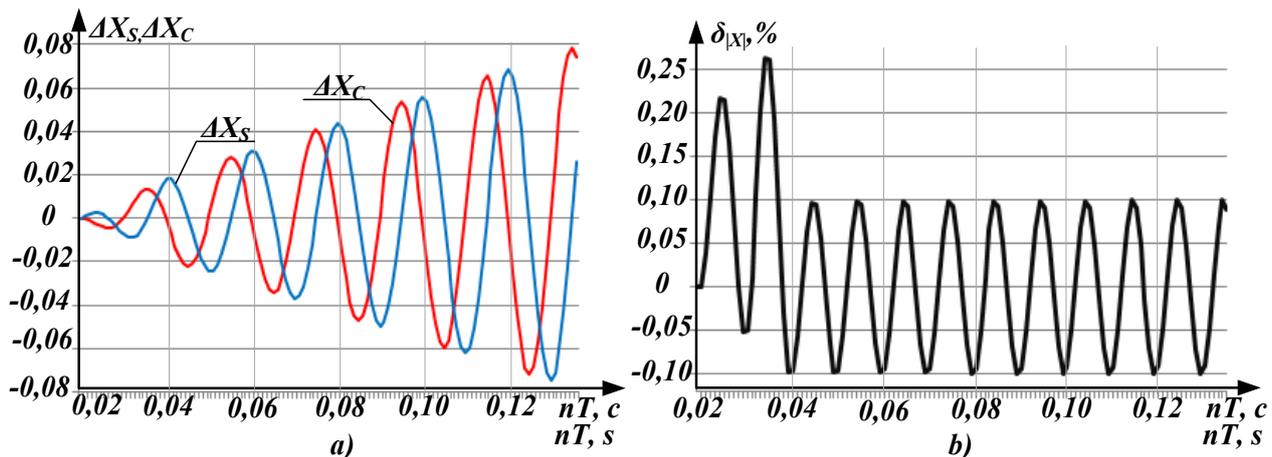


Рис. 3. Зависимость погрешности вычисления модульной составляющей сигнала при изменении частоты сети для различных значений  $N$

Fig. 3. Dependence of the calculation error of the signal modular component under network frequency variation for different values of  $N$



**Рис. 4. Зависимости изменения отклонения синусоидальной  $\Delta X_s$  и косинусоидальной  $\Delta X_c$  (а) и относительной погрешности вычисления модуля  $\delta_{|x|}$  (б) от времени вычисления  $nT$  при изменении частоты сигнала на 0,1 Гц**  
**Fig. 4. Dependences of deviation variation of the sine  $\Delta X_s$  and cosine  $\Delta X_c$  (a) and the relative calculation error of the module  $\delta_{|x|}$  (b) on the calculation time  $nT$  when the signal frequency changes by 0.1 Hz**

При условии дальнейшего увеличения частоты модуль погрешности фильтрации будет также увеличиваться (см. рис. 2). Поскольку зависимость относительной погрешности в этом случае будет аналогична зависимости на рис. 4 б, возможны нарушения работы быстродействующих защит, у которых время принятия решения о срабатывании составляет не более периода промышленной частоты.

Таким образом, при существенном изменении частоты в системе (более 1 Гц) рекурсивные фильтры Фурье имеют значительные погрешности вычисления ортогональных

составляющих сигнала. Однако величины данных погрешностей на порядок меньше погрешностей электромагнитных трансформаторов тока в режимах насыщения от апериодической составляющей тока КЗ.

Необходимо также отметить, что при изменении частоты основной гармоники сигнала частоты всех кратных гармоник, присутствующих в сигнале, также изменят свое значение согласно формуле  $f_q = q \cdot f_0$ . Это, в свою очередь, приведет к появлению погрешности вычислений от влияния данных гармоник, так как коэффициент их усиления будет отличен от нуля (см. рис. 1).

### Оценка влияния аperiodической составляющей сигнала на результаты фильтрации

Как было упомянуто выше, при КЗ в сигнале тока может присутствовать аperiodическая (экспоненциальная) составляющая, влияющая на результат фильтрации. Поэтому важной задачей является оценка погрешности вычислений при данной помехе. Математически аналоговый экспоненциальный сигнал  $x_a(t)$  с декрементом затухания  $\gamma = 1/\tau$  можно описать следующим выражением [15]:

$$x_a(t) = X_a \cdot e^{-t/\tau} = X_a \cdot e^{-t \cdot \gamma}.$$

В дискретной форме записи данный сигнал примет следующий вид:

$$x_a(nT) = X_a \cdot e^{-nT/\tau} = X_a \cdot e^{-n \cdot \gamma \cdot T}.$$

Согласно данному выражению, на результаты фильтрации будет влиять не только величина начального значения  $X_a$  и декремента затухания  $\gamma$ , но и период дискретизации  $T$ .

Оценка влияния величины  $\gamma$  на результат вычислений была произведена для



сигнала, описываемого следующей формулой:

$$x(t) = X_m \cdot \sin(\omega_0 t) + X_a \cdot e^{-t\gamma},$$

где  $X_m = X_a = 1$ , при числе выборок  $N = 20$ . Ввиду того, что истинное значение косинусной составляющей и фазы синусоидального сигнала в момент  $nT = 0,019$  с равняется нулю, расчет был произведен для момента времени  $nT = 0,02$  с (т.е. при сдвиге окна данных на одну выборку). При таком сдвиге в результате фильтрации будет присутствовать добавка к значению угла, определяемая как

$$\Delta\varphi = \varphi(nT) - \varphi((n-1)T) = 360/N = 18^\circ [12].$$

Данное значение принималось в качестве истинного значения фазы в момент 0,02 с. Значение синусной и косинусной составляющих при  $nT = 0,02$  с должно быть соответственно  $X_{s0r4} = 0,951$ ,  $X_{c0r4} = 0,309$ . Полученные результаты вычислений относительной погрешности фильтрации для синусной  $\delta_s$ , косинусной  $\delta_c$ , амплитудной  $\delta_{|x|}$  составляющих и угла  $\delta_\varphi$  по сравнению с синусоидальным сигналом частотой 50 Гц представлены в виде графиков на рис. 5.

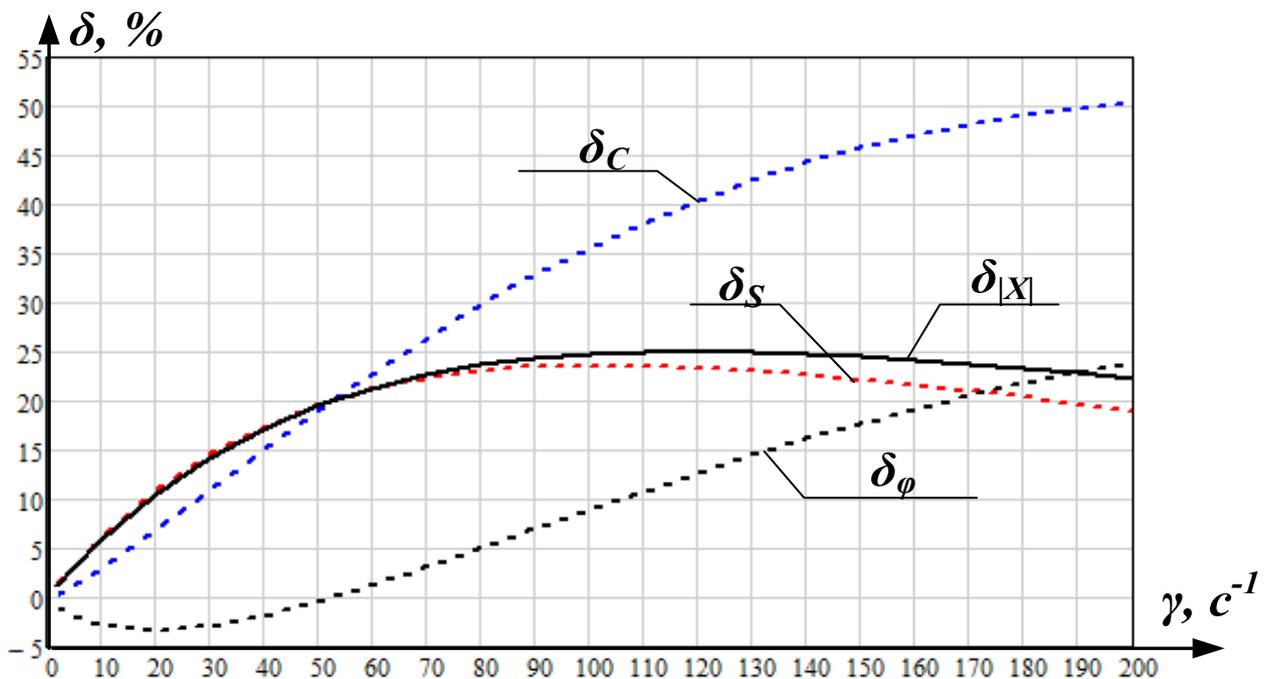


Рис. 5. Зависимость погрешности вычислений параметров сигнала фильтрами Фурье от величины декремента затухания

Fig. 5. Dependence of the error of signal parameter calculations by Fourier filters on the value of the attenuation factor

Анализируя полученные зависимости, можно сделать вывод, что наличие экспоненциальной помехи во входном сигнале устройства защиты вносит существенную погрешность в результаты вычислений фильтрами Фурье параметров сигналов, причем максимумы погрешности различны для составляющих. Так, погрешность выделения синусной составляющей, начиная со

значения  $\delta_s = 1,38\%$  ( $\gamma = 2$ ), увеличивается до значения  $\delta_{s_{max}} = 23,64\%$  ( $\gamma = 100$ ), а затем уменьшается до  $\delta_s = 19,0\%$  ( $\gamma = 200$ ). Максимум погрешности вычисления модуля сигнала соответствует значению декремента  $\gamma = 120$  ( $\delta_{|x|} = 25,14\%$ ), причем вид данной зависимости практически аналогичен зависимости  $\delta_s$ . Различие

максимумов погрешностей объясняется тем, что скорость нарастания погрешности косинусной составляющей намного больше, чем синусной. Причем максимум находится в конце интервала  $\gamma$  и равен  $\delta_{C_{\max}} = 50,43\%$ . Это, в свою очередь, объясняется тем, что исходный сигнал имеет значительно большую корреляцию с базисной функцией синуса по сравнению с корреляцией с функцией косинуса. В результате этого погрешность вычисления угла также является максимальной при  $\gamma = 200$  и равна  $\delta_{\varphi_{\max}} = 24,05\%$ . Необходимо отметить также, что до значения  $\gamma = 60$  погрешность вычисления угла является отрицательной, что может негативно сказаться на работе защит, реагирующих на величину угла тока или напряжения.

Для вышерассмотренного сигнала для значения  $\gamma = 120$ , при котором погрешность определения модуля максимальна, вычислена зависимость погрешности фильтрации от числа выборок  $N$  за период промышленной частоты. Результаты представлены на рис. 6.

При росте  $N$  от 12 до 30 можно отметить увеличение погрешности ( $\approx 0,04\%$  на

единицу  $N$ ). Затем погрешность увеличивается незначительно. Однако при использовании частоты дискретизации согласно МЭК 61850-9-2 ( $N = 80$ ) погрешность вычисления увеличивается на  $\approx 0,4\%$  по сравнению с частотами, которые применяются в действующих в настоящее время защитах. Это обстоятельство следует учитывать при проектировании новых устройств, поддерживающих протокол МЭК 61850-9-2.

Для полноты исследования необходимо также изучить, как изменяется погрешность во времени при затухании апериодической составляющей. Для этого была составлена зависимость результатов погрешности вычисления модуля от величины декремента затухания в различные периоды вычисления  $k$  от начала КЗ для сигнала  $x(t) = 1 \cdot \sin(\omega_0 t) + 1 \cdot e^{-t/\gamma}$  (рис. 7).

Как и получено ранее, погрешность вычисления выше для больших значений  $\gamma$ , но практически исчезает уже после 2–3 периодов промышленной частоты. Для малых значений  $\gamma$  погрешность невелика, но остается в выходном сигнале даже по истечении десяти периодов. Ввиду этого возможно ложное срабатывание защит, минимальное время срабатывания которых составляет 3–4 периода промышленной частоты.

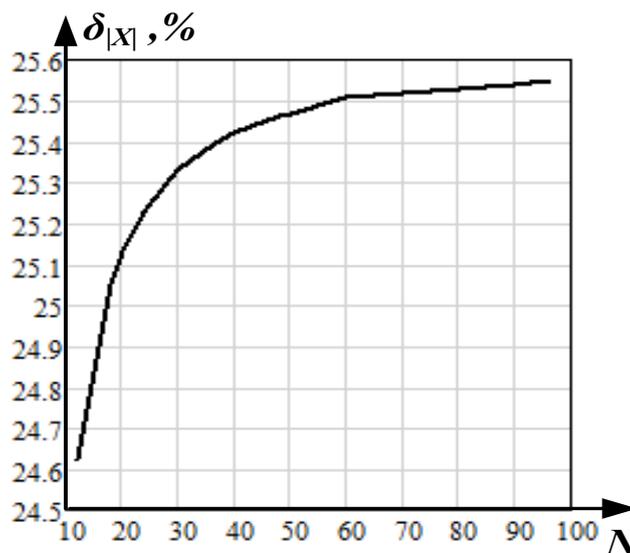
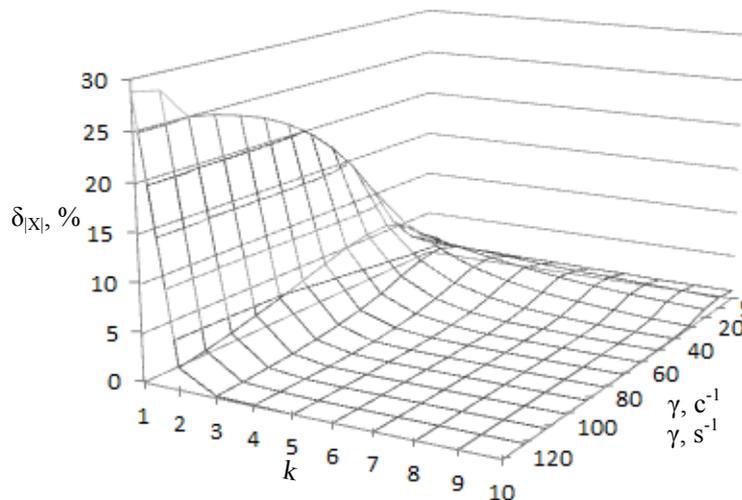


Рис. 6. Зависимость погрешности вычислений модуля от числа выборок за период промышленной частоты

Fig. 6. Dependence of the module calculation error on the number of samples during the power frequency period



**Рис. 7. Значение погрешности расчета модульной составляющей при различных декрементах затухания и периодах от начала короткого замыкания**  
**Fig. 7. Value of the calculation error of the modular component under different attenuation factors and periods from the beginning of short circuit**

### Выводы

Применение фильтров Фурье в устройствах релейной защиты позволяет выделить ортогональные составляющие без погрешности только при условии чисто синусоидального входного сигнала постоянной частоты  $f = 50$  Гц. Полученные результаты исследования позволяют выявить наиболее неблагоприятные с точки зрения вносимой погрешности составляющие и параметры сигналов и определить тем самым направление необходимой предварительной фильтрации. Так, наибольшая погрешность наблюдается при обработке сигнала, в котором присутствует апериодическая составляющая. Поскольку данная составляющая появляется в сигнале как при коротких замыканиях, так и при коммутациях, то для правильного функционирования устройств защиты в этих режимах следует применять специальные алгоритмы, направленные на исключение данной составляющей. Например, применение быстродействующего специализированного программного фильтра

[8] позволяет полностью исключить апериодическую составляющую за время, равное  $3T$ .

Помимо этого в ходе исследований получено, что увеличение частоты дискретизации входного сигнала позволяет уменьшить погрешности, вносимые составляющими некратных частот сигнала (интергармоник). Следовательно, применение частоты дискретизации 4000 Гц для фильтров Фурье целесообразно для устройств защиты, работающих в сетях с резкопеременными нагрузками (дуговые или сварочные аппараты) или статическими преобразователями. Следует отметить, что с увеличением частоты дискретизации в среднем на 1% возрастают погрешности как при изменении частоты в энергосистеме, так и при наличии апериодической составляющей. Данное обстоятельство необходимо учитывать при проектировании новых устройств защиты.

### Библиографический список

1. Булычев А.В. Инженерно-экономическое обоснование инвестиций в научно-исследовательские работы по релейной защите и автоматике электроэнер-

гетических систем // Вестник Чувашского университета. 2017. № 1. С. 61–75.

2. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита. М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.



3. Романюк Ф.А., Шевалдин М.А. Совершенствование алгоритма формирования ортогональных составляющих входных величин в микропроцессорных защитах линий распределительных сетей // Энергетика. Известия вузов и энергетических объединений СНГ. 2014. № 1. С. 5–11.
4. Румянцев Ю.В. Комплексная модель для исследования функционирования цифровой дифференциальной защиты силового трансформатора // Энергетика. Известия вузов и энергетических объединений СНГ. 2016. № 3. С. 203–224. DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-3-203–224.
5. Румянцев Ю.В., Романюк Ф.А., Румянцев В.Ю. и др. Реализация цифровых фильтров в микропроцессорных устройствах релейной защиты // Энергетика. Известия вузов и энергетических объединений СНГ. 2016. № 5. С. 397–417. DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-5-397-417.
6. Sharma K. K. New Algorithms for Removal of DC Offset and Subsynchronous Resonance terms in the Current and Voltage Signals under Fault Conditions. WSEAS Transactions on Power Systems. 2014. Vol. 9. P. 103–110.
7. Гуревич В.И. Микропроцессорные реле защиты: новые перспективы или новые проблемы? // Новости электротехники. 2005. № 6 (36). С. 57–60.
8. Овчаренко Н.И. Цифровые аппаратные и программные элементы микропроцессорной релейной защиты и автоматики энергосистем. Библиотека

- электротехника, приложение к журналу «Энергетик». М.: НТФ «Энергопрогресс», 2006. Вып. 5-6 (89–90). 120 с.
9. Баранов П.Ф., Муравьев С.В., Сулайманов А.О. Программное обеспечение для эмуляции передачи мгновенных значений измерений в соответствии со стандартом МЭК 61850 // Известия Томского политехнического университета. 2014. Т. 324. № 5. С. 131–139.
10. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 758 с.
11. Осак А.Б., Панасецкий Д.А., Бузина Е.Я. Интеллектуальное противоаварийное управление с учетом режимов работы потребителей // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 9 (128). С. 173–184. <https://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2017-9-173-184>.
12. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов. 2-е изд. / пер. с англ. М.: ООО «Бином-Пресс», 2006. 656 с.
13. Prabhu K. M. M. Window functions and their applications in signal processing. CRC Press, Taylor&Francis Group, 2018, 382 p.
14. Sozanski K. Digital Signal Processing in Power Electronics Control Circuits. Second Edition. New York: Springer, 2017. 354 p.
15. Муссонов Г.П. Определение параметров переходных процессов по цифровым данным. Ч. 1. // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. № 2. С. 73–81.

### References

1. Bulychev A.V. Feasibility study of investments in research and development in power system protection field. *Vestnik Chuvashskogo universiteta* [Bulletin of the Chuvash State University], 2017, no. 1, pp. 61–75. (In Russian)
2. Shneerson Je.M. *Cifrovaya relejnaja zashhita* [Digital relay protection]. Moscow: Energoatomizdat Publ, 2007, 549 p. (In Russian)
3. Romaniuk F.A., Shevaldin M.A. Improvement of Algorithm for Formation of Orthogonal Components of Input Values in Microprocessor Relay Protection of Power Lines in Distribution Networks. *Energetika. Izvestiya vuzov i energeticheskikh ob"edinenij SNG* [Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations], 2014, no. 1, pp. 5–11. (In Russian)
4. Rumiantsev Yu.V. A comprehensive model for the power transformer digital differential protection functioning research. *Energetika. Izvestiya vuzov i energeticheskikh ob"edinenij SNG* [Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations], 2016, no. 3, pp. 203–224. DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-3-203-224. (In Russian)
5. Rumiantsev Yu.V., Romaniuk F.A., Rumiantsev V.Yu. Digital filters implementation in microprocessor-based relay protection. *Energetika. Izv. vyssh. ucheb. zavedenij i energ. Ob"edinenij SNG* [Energetika. Proceedings of

- CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations], 2016, vol. 59, no. 5, pp. 397–417. DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-5-397-417. (In Russian)
6. Sharma K. K. New Algorithms for Removal of DC Offset and Subsynchronous Resonance terms in the Current and Voltage Signals under Fault Conditions. WSEAS Transactions on Power Systems. 2014, vol. 9, pp. 103–110.
7. Gurevich V.I. Microprocessor protection relays: new prospects or new problems? *Novosti jelektrrotehniki* [Electrical Engineering News], 2005, no. 6 (36), pp. 57–60. (In Russian)
8. Ovcharenko N.I. *Tsifrovye apparatnye i programmnye elementy mikroprotsessornoj releinoj zashchity i avtomatiki energosistem*. [Digital hardware and software elements of power system microprocessor relay protection and automation]. *Bibliotekha elektrotehnika, prilozhenie k zhurnalu "Energetik"* [Electrical engineer library, supplement to the Journal "Power Engineer"]. Moscow: NTF «Energoprogress» Publ., 2006, Issue 5-6 (89-90), 120 p. (In Russian)
9. Baranov P.F., Muravyov S.V., Sulaymanov A.O. Software for emulating the sampled values transmission in accordance with IEC 61850 Standard. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University], 2014, vol. 324, no. 5, pp. 131–139. (In Russian)



10. Sergienko A.B. *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital signal processing]. St. Petersburg: BKhV-Peterburg Publ., 2011, 758 p. (In Russian)
11. Osak A.B., Panasetsky D.A., Buzina E.Y. Consumer operation mode-wise intelligent emergency control. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2017, vol. 21, no. 9, pp. 173–184. <https://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2017-9-173-184>. (In Russian)
12. Lyons R. *Digital Signal Processing: Second edition*. Translated from English, 2006, 656 p. (Russian edition: *Cifrovaya obrabotka signalov*. Moscow, ООО «Binom-

Press», 2006, 656 p.).

13. Prabhu K. M. M. *Window functions and their applications in signal processing*. CRC Press, Taylor&Francis Group, 2018, 382 p.
14. Sozanski K. *Digital signal processing in power electronics control circuits*. Second Edition. New York, Springer, 2017, 354 p.
15. Mussonov G.P. Digital data-based determination of transient parameters (Part 1). *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2016, vol. 109, no. 2, pp. 73–80. (In Russian)

#### Критерии авторства

Солопов Р.В., Ковженкин В.С., Вайтеленко Л.В. совместно провели анализ амплитудно-частотных характеристик фильтров, выявили предельно минимальную частоту дискретизации сигнала, получили численную оценку погрешности фильтрации при различных воздействующих факторах. Солопов Р.В., Ковженкин В.С. провели оценку погрешностей фильтров Фурье при изменении основной частоты. Ковженкин В.С., Вайтеленко Л.В. оценили влияние аperiodической составляющей сигнала на результаты фильтрации. Несут ответственность за плагиат.

#### Authorship criteria

Solopov R.V., Kovzhenkin V.S., Vaitelenok L.V. have conducted the analysis of amplitude-frequency characteristics of filters, revealed the extreme minimum frequency of signal discretization, obtained the numerical estimate of the filtering error for various factors. Solopov R.V., Kovzhenkin V.S. estimated Fourier filter errors when changing the fundamental frequency. Kovzhenkin V.S., Vaitelenok L.V. evaluated the effect of the aperiodic signal component on filtering results and bear the responsibility for plagiarism.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.



Оригинальная статья / Original article

УДК 518.5:532.54

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-10-129-140>

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РАСЩЕПЛЕНИЯ ГРАФА ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОВОЙ СЕТИ

© С.В. Якшин<sup>1</sup>

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,  
664033, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

**РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЮ** исследования является аналитическое решение задачи потокораспределения многоконтурной тепловой сети и использование этого решения при оптимизации параметров тепловой сети. **МЕТОД.** Метод расщепления графа, математическое моделирование гидравлической цепи, аналитический метод решения алгебраического уравнения четвертой степени. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Задача потокораспределения сведена к алгебраическому уравнению четвертой степени и получены решения этого уравнения методом Феррари. Проведена оценка погрешности приближенного аналитического решения задачи. Найден зависимости экономической целевой функции от параметров схемы тепловой сети. **ВЫВОДЫ.** Предложенный метод расщепления графа позволил свести задачу потокораспределения к алгебраическому уравнению и получить его аналитическое решение, что существенно снизило объем вычислительной работы при моделировании и оптимизации гидравлической цепи. Линейное приближение функции, содержащей квадратный корень, дает результат с точностью, приемлемой для инженерных расчетов.

**Ключевые слова:** тепловая сеть, гидравлический расчет, многоконтурность, потокораспределение, аналитический расчет, экономическая эффективность.

**Информация о статье.** Дата поступления 25 мая 2018 г.; дата принятия к печати 28 сентября 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 октября 2018 г.

**Формат цитирования.** Якшин С.В. Применение метода расщепления графа при оптимизации параметров тепловой сети // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 10. С. 129–140. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-129-140

### APPLICATION OF GRAPH SPLITTANCE METHOD WHEN OPTIMIZING HEATING NETWORK PARAMETERS

S.V. Yakshin

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,  
130, Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russian Federation

**ABSTRACT.** The **PURPOSE** of the study is an analytical solution of the flow distribution problem of a multi-circuit heating network and the use of this solution in the optimization of heating network parameters. **METHOD.** The study uses the method of splittance of graph, the mathematical modeling of a hydraulic circuit, the analytical method for solving biquadratic equation. **RESULTS.** The problem of flow distribution is reduced to an algebraic equation of the fourth degree, which is solved by Ferrari method. The error of the approximate analytical solution of the problem is estimated. The dependences of the economic value function on the parameters of the heating network circuit are found. **CONCLUSIONS.** The proposed method of graph splittance allowed to reduce the problem of flow distribution to the algebraic equation and obtain its analytical solution. This significantly reduced the amount of computational work when hydraulic circuit modeling and optimization. The linear approximation of the function containing the square root gives the result, the accuracy of which is acceptable for engineering calculations.

**Keywords:** heating network, hydraulic calculation, multi-circuit, flow distribution, analytical calculation, economic efficiency

**Information about the article.** Received May 25, 2018; accepted for publication September 28, 2018; available online October 31, 2018.

<sup>1</sup>Якшин Сергей Владимирович, ведущий инженер, e-mail: s.yakshin@isem.irk.ru  
Sergey V. Yakshin, Leading Engineer, e-mail: s.yakshin@isem.irk.ru



**For citation.** Yakshin S.V. Application of graph splittance method when optimizing heating network parameters. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 10, pp. 129–140. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-129-140. (In Russian).

## Введение

Топливо-энергетический комплекс (ТЭК) России включает в себя шесть отраслевых систем: угле-, газо-, нефтеснабжение, атомную энергетику, электроэнергетику и теплоснабжение. Все эти отрасли используют трубопроводные системы. Поэтому выбор наиболее экономичных вариантов развития трубопроводных и, в частности, теплоснабжающих систем является актуальной задачей. Решение практических задач по расчету сложных многоконтурных тепловых сетей приводит к исследованию потокораспределения и выбору оптимальной конфигурации тепловой сети. В тридцатые годы прошлого века аналитические методы технико-экономического расчета получили большое развитие в нашей стране в связи с периодом индустриализации и созданием систем централизованного электро-, тепло- и водоснабжения городов и промышленных центров. Именно в эти годы появились известные работы Л.К. Якимова, А.М. Занфирова, Б.Л. Шифринсона, В.Г. Лобачева, М.В. Кирсанова, Л.Ф. Мошниина и других авторов. Основы теории гидравлических цепей (ТГЦ) были сформулированы в шестидесятые годы прошлого века В.Я. Хасилевым [1]. Появление вычислительной техники позволило решать задачи большой размерности в плане проектирования, эксплуатации и развития трубопроводных систем [2–6].

Модельный аппарат и методы решения задач потокораспределения являются фундаментом ТГЦ. В основе этой теории лежат законы Кирхгофа для узлов и контуров гидравлической цепи. В настоящее время методы решения задач потокораспределения – это набор численных методов, к которым предъявляются требования сходимости и быстродействия. В работе [7] был предложен метод расщепления графа (МРГ). С помощью МРГ задача потокораспределения тепловой сети сведена к решению алгебраического уравнения и получено решение этого уравнения графически. Следующий этап исследования – это поиск возможности представить решение в аналитическом виде. В настоящей работе получено уравнение четвертой степени с помощью линейной аппроксимации функции, содержащей квадратный корень, и его решение в радикалах. На примере четырехконтурной схемы проведен анализ погрешности, возникающей при аппроксимации функции. На основе анализа сделан вывод, что полученное решение имеет погрешность, приемлемую для инженерных расчетов. В качестве примера проведена оптимизация параметров четырехконтурной схемы тепловой сети с применением полученного аналитического решения.

## Математическая модель

Сформулируем математическую модель тепловой сети с сосредоточенными параметрами при известных технических характеристиках узлов и ветвей:

первый закон Кирхгофа

$$Ax = Q, \quad (1)$$

второй закон Кирхгофа

$$BZXx = BP, \quad (2)$$

$$\underline{w} \leq w \leq \overline{w}, \quad (3)$$

где  $x = (x_1, \dots, x_n)^T$  – вектор расходов на ветвях;  $Q = (Q_1, \dots, Q_n)^T$  – вектор расходов в узлах;  $A$  – матрица соединений для линейно независимых узлов;  $B$  – матрица контуров;  $Z$  – диагональная матрица гидравлических со-



противлений трубопроводов;  $X$  – диагональная матрица расходов на ветвях;  $P$  – вектор действующих давлений;  $w$  – вектор пара-

метров схемы, имеющих ограничения;  $\underline{w}$  – вектор нижних ограничений;  $\overline{w}$  – вектор верхних ограничений.

### Метод расщепления графа

Применение МРГ в [7] показано на четырехконтурной симметричной сети, включающей насосную установку (рис. 1).

Система уравнений для данной схемы тепловой сети (рис. 1, а) содержит восемь уравнений для восьми неизвестных.

$$x_1 - x_7 - x_8 = 0, \quad (4)$$

$$x_1 - x_2 - x_5 - x_6 = 0, \quad (5)$$

$$x_4 + x_6 - x_7 = 0, \quad (6)$$

$$x_3 + x_5 - x_8 = 0, \quad (7)$$

$$x_i \geq 0, \quad (8)$$

$$z_2 x_2^2 + z_4 x_4^2 - z_6 x_6^2 = 0, \quad (9)$$

$$z_2 x_2^2 + z_3 x_3^2 - z_5 x_5^2 = 0, \quad (10)$$

$$z_1 x_1^2 + z_6 x_6^2 + z_7 x_7^2 = P, \quad (11)$$

$$z_1 x_1^2 + z_5 x_5^2 + z_8 x_8^2 = P, \quad (12)$$

где  $x_i$  – объемный расход жидкости;  $z_i$  – коэффициент гидравлического сопротивления жидкости в трубопроводе.

Предполагается условное расщепление второй ветви на два параллельных участка с сохранением всех физических параметров сети. Таким образом, получим преобразование исходного графа (рис. 1 а) в граф с расщепленной второй ветвью (рис. 1 б), которая вместо гидравлического сопротивления  $z_2$  имеет два неизвестных гидравлических сопротивления:  $s_1$  – ветвь 2 – 3<sup>1</sup> и  $s_2$  – ветвь 2 – 3<sup>2</sup>. В связи с этим добавляются к системе (4)–(12) два уравнения (13)–(14).

$$s_1 x_4^2 = s_2 x_3^2, \quad (13)$$

$$s_3 x_7^2 = s_4 x_8^2. \quad (14)$$

Система уравнений (4)–(14) методом последовательного исключения неизвестных приводится к одному алгебраическому уравнению с одной неизвестной величиной  $s_1$ .

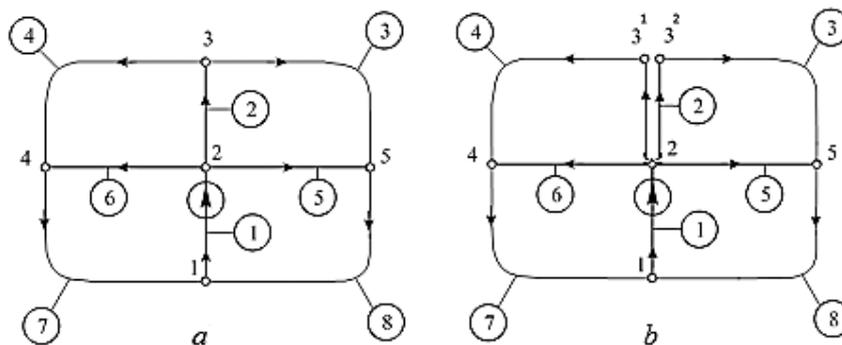


Рис. 1. Гидравлическая цепь: а – замкнутая исходная схема сети; б – преобразование схемы с расщеплением второй ветви:  $\odot$  – источник движущего давления; 1–5 – номера узлов; цифры в кружках номера ветвей; стрелки на линиях – заданные направления потоков на ветвях  
Fig. 1. Hydraulic circuit: а – original closed circuit of a network; б – network transformation with the split of the second branch:  $\odot$  – source of driving pressure; 1–5 – node numbers; figures in the circles stand for the numbers of branches; arrows on the lines – set directions of flows on branches



$$\frac{s_1 z_6}{s_5 \left[ z_6 + z_7 \left( 1 + \sqrt{\frac{z_6}{s_5}} \right)^2 \right]} = \frac{s_2 z_5}{s_6 \left[ z_5 + z_8 \left( 1 + \sqrt{\frac{z_5}{s_6}} \right)^2 \right]}, \quad (15)$$

новые обозначения  $s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6$  гидравлических сопротивлений приведены в табл. 1.

### Аналитическое решение задачи потокораспределения

Для поиска решения уравнения (15) представим его в виде равенства двух функций (16), (17) и исследуем графически функции  $f_1(s_1), f_2(s_1)$  (рис. 2) в зависимости от коэффициентов гидравлического сопротивления  $s_i$  и  $z_i$  (табл. 3):

$$f_1(s_1) = \left( \frac{z_5 + z_8}{z_5} \right) s_1 + \frac{z_3 z_5 + (z_3 + z_5) z_8}{z_2 z_5} (\sqrt{s_1} - \sqrt{z_2})^2 + \frac{2 z_8}{\sqrt{z_2 z_5}} \quad (16)$$

$$\sqrt{s_1 (\sqrt{s_1} - \sqrt{z_2})^2 + \frac{z_3}{z_2} (\sqrt{s_1} - \sqrt{z_2})^4},$$

$$f_2(s_1) = (s_1 + z_4) \left( 1 + \frac{z_7}{z_6} \right) + 2 z_7 \sqrt{\frac{(s_1 + z_4)}{z_6}} + z_7. \quad (17)$$

Из графика (рис. 2) видно, что функция  $f_2(s_1)$  имеет линейную зависимость от  $s_1$ . Разложим подкоренное выражение функции  $f_2(s_1)$  в ряд Тейлора и используем линейную часть разложения (18).

$$\sqrt{\frac{(s_1 + z_4)}{z_6}} = \sqrt{\frac{z_4}{z_6}} \left( 1 + \frac{s_1}{2 z_4} \right), \quad (18)$$

тогда  $f_2(s_1)$  примет вид

$$f_2(s_1) = (s_1 + z_4) \left( 1 + \frac{z_7}{z_6} \right) + 2 z_7 \sqrt{\frac{z_4}{z_6}} \left( 1 + \frac{s_1}{2 z_4} \right) + z_7. \quad (19)$$

Теперь представим равенство двух функций в виде полинома (20) с коэффициентами  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4$  (табл. 2):

$$a_0 + a_1 \sqrt{s_1} + a_2 s_1 + a_3 s_1 \sqrt{s_1} + a_4 s_1^2 = 0. \quad (20)$$

Для решения уравнения (20) введем обозначение  $t = \sqrt{s_1}$  и получим уравнение четвертой степени для  $t$  (21):

$$a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 = 0. \quad (21)$$

Таким образом, задача потокораспределения для симметричной четырехконтурной схемы сведена к решению одного алгебраического уравнения (21) в виде полинома четвертой степени. Известно, что уравнение четвертой степени разрешимо в радикалах<sup>2</sup>. Преобразуем уравнение (21) к виду без коэффициента при максимальной степени переменной величины

$$t^4 + at^3 + bt^2 + ct + d = 0, \quad (22)$$

с коэффициентами

$$a = \frac{a_3}{a_4}, \quad b = \frac{a_2}{a_4}, \quad c = \frac{a_1}{a_4}, \quad d = \frac{a_0}{a_4}.$$

Уравнение (22) решается методом Феррари с использованием формул Кардано для нахождения корней кубических уравнений.

Для определения точности расчетов сравним полученные результаты с помощью численного и аналитического решений уравнений (15). На основе исходных данных (табл. 3) решаем численно уравнение (15),

<sup>2</sup>Курш А.Г. Курс высшей алгебры. М.: Наука, 1968. 432 с. / Kurosh A.G. The course of higher algebra. M.: Science, 1968. 432 p.



Таблица 1

Аналитические выражения для вектора расходов

Table 1

Analytical expressions for the flow rate vector

№	Вектор расходов на ветвях	
	Обозначения переменных величин	Схема рис. 1 а
1	$s_1$ – независимая переменная величина, гидравлическое сопротивление, рис. 1 б, ветвь 2 – 3 <sup>1</sup>	$x_1 = \sqrt{\frac{P}{\frac{s_3 s_4}{(\sqrt{s_3} + \sqrt{s_4})^2} + z_1}}$
2	$s_2 = s_1 \frac{z_2}{(\sqrt{s_1} - \sqrt{z_2})^2}$	$x_2 = x_1 - x_5 - x_6$
3	$s_3 = (s_1 + z_4) \frac{z_6}{(\sqrt{s_1 + z_4} + \sqrt{z_6})^2} + z_7$	$x_3 = \frac{x_8}{\sqrt{\frac{s_6}{z_5} + 1}}$
4	$s_4 = (s_2 + z_3) \frac{z_5}{(\sqrt{s_2 + z_3} + \sqrt{z_5})^2} + z_8$	$x_4 = \frac{x_7}{\sqrt{\frac{s_5}{z_6} + 1}}$
5	$s_5 = s_1 + z_4$	$x_5 = x_8 - x_3$
6	$s_6 = s_2 + z_3$	$x_6 = x_7 - x_4$
7	–	$x_7 = \sqrt{\frac{P - z_1 x_1^2}{s_3}}$
8	–	$x_8 = \sqrt{\frac{P - z_1 x_1^2}{s_4}}$

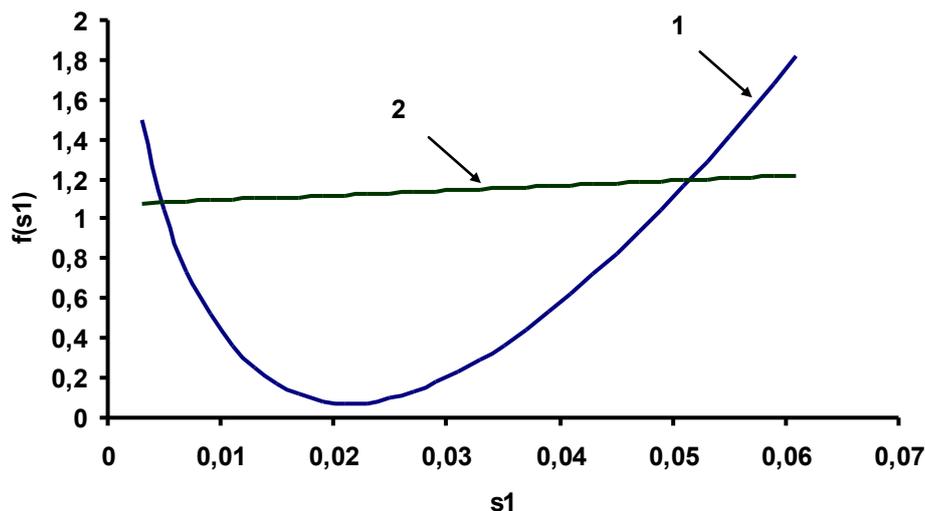


Рис. 2. Графики функций: 1 –  $f_1(s_1)$  выражение (16); 2 –  $f_2(s_1)$  выражение (17) при варьировании гидравлического сопротивления  $s_1$

Fig. 2. Function graphs: 1 –  $f_1(s_1)$  expression (16); 2 –  $f_2(s_1)$  expression (17) under flow resistance  $s_1$  variation



Таблица 2

Коэффициенты уравнения четвертой степени (21)

Table 2

Coefficients of the biquadratic equation (21)

Кoeffициент	Расчетные выражения для коэффициентов полинома
$a_0$	$4\left(\frac{z_4 z_7^2}{z_6} - \frac{z_3 z_8^2}{z_5}\right) + \delta^2 + \gamma^2 + (4z_7 \sqrt{\frac{z_4}{z_6}} - 2\delta)\gamma - 4z_7 \sqrt{\frac{z_4}{z_6}} \delta$
$a_1$	$8\delta \frac{z_7}{\sqrt{z_2}} \frac{\sqrt{z_4}}{\sqrt{z_6}} + \frac{4}{\sqrt{z_2}} (\delta\gamma - \delta^2 + 4 \frac{z_3 z_8^2}{z_5})$
$a_2$	$4 \frac{z_7^2}{z_6} + 2 \frac{z_7}{\sqrt{z_4 z_6}} (\gamma - \delta) + \frac{6}{z_2} (\delta^2 - 4 \frac{z_3 z_8^2}{z_5}) - 2\delta\epsilon - 4 \frac{z_8^2}{z_5} + 4z_7 (\epsilon - \frac{\delta}{z_2}) \sqrt{\frac{z_4}{z_6}} + 2\gamma\epsilon - 2 \frac{\delta\gamma}{z_2}$
$a_3$	$4\delta \frac{\epsilon}{\sqrt{z_2}} + \frac{8}{z_5 \sqrt{z_2}} z_8^2 - \frac{4}{z_2 \sqrt{z_2}} (\delta^2 - 4 \frac{z_3 z_8^2}{z_5}) + 4\delta \frac{z_7}{\sqrt{z_2 z_4 z_6}}$
$a_4$	$\epsilon^2 + \frac{1}{z_2} (\delta^2 - 4 \frac{z_3 z_8^2}{z_5}) - 2 \frac{\delta\epsilon}{z_2} - 4 \frac{z_8^2}{z_2 z_5} + 2(\epsilon - \frac{\delta}{z_2}) \frac{z_7}{\sqrt{z_4 z_6}}$
$\gamma$	$z_4 + z_4 \frac{z_7}{z_6} + z_7$
$\delta$	$z_3 + z_3 \frac{z_8}{z_5} + z_8$
$\epsilon$	$\frac{z_7}{z_6} - \frac{z_8}{z_5}$

Таблица 3

Потокораспределение для схемы тепловой сети (рис. 1)

Table 3

Flow distribution for the heating network circuit (Fig. 1)

Ветвь	Диаметр ветви, м	Длина ветви, м	Коэффициент сопротивления, МПа·с <sup>2</sup> /м <sup>6</sup>	Объемный расход, м <sup>3</sup> /с	Погрешность расчетов в %
1-2	1,2	1000	0,0049	3,0152	8·10 <sup>-10</sup>
2-3	0,9	1000	0,0222	0,8304	6·10 <sup>-5</sup>
3-5	0,5	2000	0,8327	0,2848	5·10 <sup>-4</sup>
3-4	0,6	2000	0,3308	0,5455	2·10 <sup>-4</sup>
2-5	0,7	1000	0,0819	1,0061	1·10 <sup>-4</sup>
2-4	0,7	1000	0,0819	1,1788	5·10 <sup>-5</sup>
4-1	0,8	2000	0,0814	1,7243	2·10 <sup>-5</sup>
5-1	0,7	2000	0,1638	1,2909	3·10 <sup>-5</sup>

Примечание: движущее давление P = 400000 Па / The driving pressure P = 400000 Pa.



получим  $s_1 = 0,051474615 \text{ МПа} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^6$ . Аналитическое решение уравнения (22) дает второе значение для  $s_1 = 0,051472803 \text{ МПа} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^6$ . Далее используем зависимости для вектора расходов из табл. 1 и заполняем табл. 3.

### Приближенное решение задачи потокораспределения

В работе [7] была рассмотрена шестиконтурная схема тепловой сети (рис. 3).

Для решения задачи потокораспределения замкнутая схема сети (рис. 3 а) преобразуется в схему с расщеплением второй и девятой ветвей (рис. 3 б). В этом случае дополнительно получаем два неизвестных гидравлических сопротивления:  $s_1$  – ветвь 2–3<sup>1</sup> и  $k_1$  – ветвь 3<sup>1</sup>–6<sup>1</sup> (рис. 3 б), что приводит к уравнению (23)

$$f(s_1, k_1) = \frac{s_1 z_6}{k_5 \left[ z_6 + z_7 \left( 1 + \sqrt{\frac{z_6}{k_5}} \right)^2 \right]} - \frac{s_2 z_5}{k_6 \left[ z_5 + z_8 \left( 1 + \sqrt{\frac{z_5}{k_6}} \right)^2 \right]} = 0. \quad (23)$$

Из табл. 3 видно, что расчеты выполненные с помощью аналитического решения уравнения (15) дают результат с погрешностью не более чем на одну тысячную процента.

Уравнение (23) является алгебраическим уравнением от двух переменных и в этом случае требуется замыкающее уравнение или условие для определения  $k_1$ . Одним из таких условий может быть равенство гидравлических сопротивлений  $k_1$  и  $k_2$ , где  $k_2$  – гидравлическое сопротивление ветви 3<sup>2</sup>–6<sup>2</sup>. Тогда из уравнения связи  $k_1$  и  $k_2$  (аналог связи  $s_1$  и  $s_2$  табл. 1):

$$k_2 = k_1 \frac{z_9}{\left( \sqrt{k_1} - \sqrt{z_9} \right)^2} \quad (24)$$

получим, что  $k_1 = 4z_9$ .

В результате такое приближение для неизвестной величины  $k_1$  позволяет свести решение задачи потокораспределения шестиконтурной схемы к решению (15) уравнения (табл. 4).

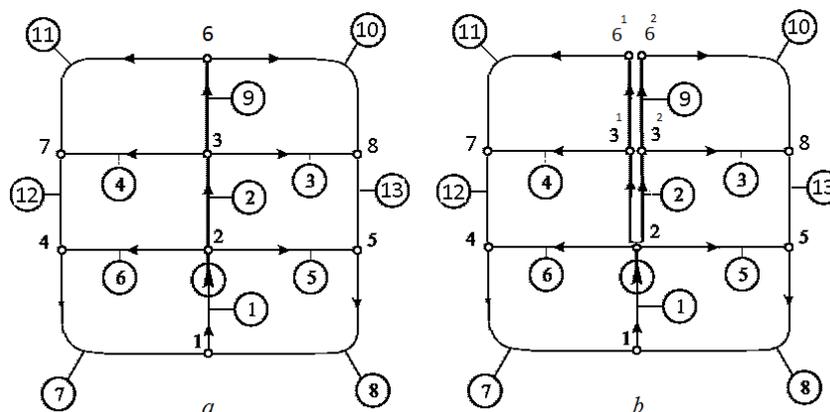


Рис. 3. Гидравлическая цепь: а – замкнутая исходная схема сети; б – преобразование сети с расщеплением второй и девятой ветвей: ⊕ – источник движущего давления; 1–8 – номера узлов; цифры в кружках – номера ветвей; стрелки на линиях – заданные направления потоков на ветвях  
Fig. 3. Hydraulic circuit: а – original closed circuit of a network; б – network transformation with the split of the second and the ninth branch: ⊕ – source of driving pressure; 1–8 – node numbers; figures in the circles stand for the numbers of branches; arrows on the lines – set directions of flows on branches



Таблица 4

Потокораспределение для схемы тепловой сети (рис. 3)

Table 4

Flow distribution for a heating network circuit (Fig. 3)

Ветвь	Диаметр ветви, м	Длина ветви, м	Объемный расход, м <sup>3</sup> /с	Объемный расход при $k_1 = 4z_0$ , м <sup>3</sup> /с	Погрешность расчетов в %
1–2	1,2	1000	3,04013	3,03980	1·10 <sup>-2</sup>
2–3	0,9	1000	0,90872	0,90876	4·10 <sup>-3</sup>
3–8	0,5	1000	0,21528	0,20852	3,14
3–7	0,6	1000	0,43624	0,44285	1,51
2–5	0,7	1000	0,98269	0,98043	2·10 <sup>-1</sup>
2–4	0,7	1000	1,14873	1,15061	2·10 <sup>-1</sup>
4–1	0,8	2000	1,74201	1,74079	7·10 <sup>-2</sup>
5–1	0,7	2000	1,29813	1,29900	7·10 <sup>-2</sup>
3–6	0,6	1000	0,25720	0,25740	8·10 <sup>-2</sup>
6–8	0,5	2000	0,10016	0,11006	9,89
6–7	0,5	2000	0,15704	0,14734	6,18
7–4	0,6	1000	0,59328	0,59018	5·10 <sup>-1</sup>
8–5	0,5	1000	0,31544	0,31858	0,99

Примечание: движущее давление P = 400000 Па / The driving pressure P = 400000 Pa.

Анализ табл. 4 показывает, что ветви 6–7 и 6–8 наиболее чувствительны к изменению  $k_1$ . Однако видно, что приближенный расчет дает точный баланс теплоносителя

по контурам и небольшую невязку по давлениям (14%) в контурах, содержащих ветви 6–7 и 6–8, что можно устранить с помощью нескольких итераций.

### Оптимизация тепловой сети

Методы оптимизации тепловых сетей [8–11] позволяют повысить эффективность работы трубопроводной сети, а также выбрать наилучший вариант сети по заданному критерию. В данной работе в качестве критерия оптимизации тепловой сети используется минимум целевой функции, представляющей собой зависимость расчетных затрат от искомым параметров системы [12].

$$Z = Z_c + Z_n + Z_3 + Z_T. \quad (25)$$

Здесь первое слагаемое – сумма затрат на сооружение и эксплуатацию трубопроводной сети; второе – затраты на сооружение и эксплуатацию насосной установки; третье – стоимость электроэнергии, использованной для перекачки теплоносителя; четвертое – стоимость тепловых потерь.

$$Z = (f_c + f_T + E_H) \left( a \sum_{i=1}^n l_i + b \sum_{i=1}^n d_i l_i \right) + (1 + \alpha \tau \omega c_3 + K_H (1 + \mu)) (f_H + E_H) \times (1 + \alpha) PQ / \eta, \quad (26)$$

где  $f_c$  и  $f_H$  – отчисления в долях от капиталовложений на амортизацию, ремонт и обслуживание сети и насосной установки соответственно;  $f_T$  – стоимость теплопотерь в долях от капиталовложений;  $E_H$  – нормативный коэффициент эффективности капиталовложений;  $a$  и  $b$  – коэффициенты в формуле (27), связывающей стоимость трубопроводов с их диаметром;  $n$  – число участков сети;  $\tau$  – число часов работы сети в год;  $\omega$  – коэффициент, учитывающий влияние формы графика изменения расхода воды в сети на расход энергии насосами;



$c_3$  – замыкающие затраты на 1 кВт·ч электроэнергии;  $K_H$  – стоимость единицы установленной мощности насосов;  $\mu$  – коэффициент резерва насосной установки;  $\alpha$  – коэффициент потерь напора в местных сопротивлениях;  $P$  – манометрическое давление на выходе из насоса;  $Q$  – суммарный расход воды в сети;  $\eta$  – КПД насосной установки. Капиталовложения на единицу длины сети записываются в виде линейной аппроксимации в зависимости от диаметра трубопровода<sup>3</sup>:

$$k_y = a + bd. \quad (27)$$

Запишем целевую функцию (26) для одной ветви [13]:

$$3 = Ad^{-5,25} + Bd + C, \quad (28)$$

где введены обозначения:

$$A = (\tau\omega c_3 + K_H(1 + \mu)(f_H + E_H)) \cdot (1 + \alpha) \frac{0,88\rho_w^4 \sqrt{\Delta}}{\pi^2} Q^3 \frac{l}{\eta}, \quad (29)$$

где  $\Delta$  – абсолютная шероховатость внутренней стенки трубы ( $\Delta = 0,0005$  м),  $\rho_w$  – плотность воды ( $\rho_w = 958,4$  кг/м<sup>3</sup>),

$$B = (f_C + f_T + E_H)bl, \quad (30)$$

$$C = (f_C + f_T + E_H)al. \quad (31)$$

Целевая функция (28) является выпуклой в зависимости от  $d$ , т. е. она имеет глобальный минимум. Найдем производную от 3 по  $d$  и приравняем ее нулю:

$$-5,25Ad^{-6,25} + B = 0. \quad (32)$$

Тогда из (32) найдем оптимальный диаметр для выбранной ветви сети.

$$d_0 = \left(\frac{B}{5,25A}\right)^{\frac{1}{-6,25}}. \quad (33)$$

Для разных типов трубопроводов капиталовложения на единицу длины сети (27) записывают в более общем виде, т. е. используют нелинейную аппроксимацию [14]:

$$k_y = a + bd^\beta. \quad (34)$$

В этом случае целевая функция (28) примет универсальный вид:

$$3 = Ap^\gamma + Bp^{-\rho} + C, \quad (35)$$

где  $Ap^\gamma$  – затраты на перекачку теплоносителя;  $Bp^{-\rho}$  – затраты, пропорциональные капиталовложениям в трубопроводы;  $C$  – постоянная составляющая затрат для выбранного варианта трубопроводной сети;  $A$  и  $B$  – коэффициенты, зависящие от технических и экономических показателей сети. В нашем случае при выборе диаметра трубопровода в качестве независимой переменной  $p = d$ ,  $\gamma = -5,25$ ,  $\rho = -\beta$  и, соответственно, (33) принимает вид

$$p_0 = \left(\frac{\rho B}{\gamma A}\right)^{\frac{1}{\gamma + \rho}}. \quad (36)$$

Для получения универсальных зависимостей между расчетными затратами и независимыми переменными, справедливых при разных сочетаниях исходных технико-экономических показателей, представим эти величины в относительных единицах:

$$\varepsilon = \frac{P}{P_0}, \quad (37)$$

$$\sigma = (3 - 3_0)/(3_0 - C), \quad (38)$$

где  $3_0$  – целевая функция, рассчитанная при  $p = p_0$  и заданном расходе теплоносителя.

<sup>3</sup>Справочник проектировщика. Проектирование тепловых сетей / под ред. А.А. Николаева. М., 1965. 359 с. / Designer's Guide. Design of heat networks / under edition of A.A. Nikolaev. M., 1965. 359 p.



После подстановки (35) в (38) с учетом (37) целевая функция (38) примет вид

$$\sigma(\varepsilon) = \frac{\rho\varepsilon^\gamma}{\gamma + \rho} + \frac{\gamma\varepsilon^{-\rho}}{\gamma + \rho} - 1, \quad (39)$$

и, соответственно, при

$$p = d, \quad \gamma = -5,25, \quad \rho = -\beta, \quad \beta = 1,$$

$$\sigma(\varepsilon) = 0,16\varepsilon^{-5,25} + 0,84\varepsilon - 1. \quad (40)$$

Выражение (40) можно использовать для линейной схемы (древовидной) тепловой сети при фиксированном расходе теплоносителя. Для качественного понимания зависимости целевой функции многоконтурной цепи при варьировании диаметров ветвей построены линии  $\sigma(\varepsilon)$  для ветвей схемы рис. 1 (табл. 5). Анализ показывает, что максимальное изменение целевой функции дает изменение диаметра на ветви 4–1, а минимальное – на ветви 2–3. Линейность функций можно пояснить выражением (26) при изменении диаметров в области, где мощность насоса близка к постоянной величине.

Порядок расчетов оптимальных диаметров следующий: в зависимости от мощ-

ности системы отопления выбираются диаметры трубопроводов; проводится оценка необходимого давления и расхода насоса; следующий шаг – аппроксимация характеристики насоса (41):

$$P_n = ax_1^2 + bx_1 + c, \quad (41)$$

где  $P_n$  и  $x_1$  удовлетворяют уравнению (42) табл. 1;  $a = -17535$ ;  $b = -1015,4$ ;  $c = 565715$ ;

$$x_1 = \sqrt{\frac{P_n}{\frac{s_3 s_4}{(\sqrt{s_3} + \sqrt{s_4})^2} + z_1}}; \quad (42)$$

поиск гидравлических сопротивлений  $s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6$  с помощью уравнения (15) и табл. 1; решение системы уравнений (41)–(42) относительно  $x_1$  и расчет вектора расходов  $x = (x_1, \dots, x_n)^T$  по табл. 1; определение коэффициентов  $A$  и  $B$  для всех ветвей; расчет оптимальных диаметров трубопроводов.

В данном случае ( $\beta = 1$ ,  $PQ$  – постоянная величина) целевая функция  $Z$  не является выпуклой (в зависимости от диаметра) и достигает минимума на границе области исходных (варьируемых) параметров.

Таблица 5

Линии целевой функции тепловой сети (рис. 1)

Table 5

Lines of the heating network objective function (Fig. 1)

№	Ветвь	Оптимальный диаметр, м	Целевая функция
1	1–2	1,143	$\sigma(\varepsilon) = 0,1428\varepsilon - 0,1428$
2	2–3	0,615	$\sigma(\varepsilon) = 0,0752\varepsilon - 0,0752$
3	3–5	0,368	$\sigma(\varepsilon) = 0,09\varepsilon - 0,09$
4	3–4	0,503	$\sigma(\varepsilon) = 0,123\varepsilon - 0,123$
5	2–5	0,675	$\sigma(\varepsilon) = 0,0934\varepsilon - 0,0934$
6	2–4	0,728	$\sigma(\varepsilon) = 0,105\varepsilon - 0,105$
7	4–1	0,804	$\sigma(\varepsilon) = 0,2185\varepsilon - 0,2185$
8	5–1	0,760	$\sigma(\varepsilon) = 0,1878\varepsilon - 0,1878$



## Заключение

Современное проектирование трубопроводных систем предполагает использование численных методов и комплексов программ. Существенную роль в понимании процессов и упрощении программных продуктов играют аналитические методы. В работе использовались аналитические методы для решения задачи потокораспределения и оптимизации многоконтурной тепловой сети. На основе сравнительного анализа результатов можно сделать следующие выводы:

– метод расщепления графа дает возможность свести задачу потокораспределения к решению алгебраического уравнения для симметричной схемы тепловой сети и получить аналитическое решение

этого уравнения;

– линейное приближение функции (17) при разложении в ряд Тейлора дает результат с погрешностью не более чем на одну тысячную процента по сравнению с численным решением уравнения (15);

– для схемы тепловой сети, содержащей четыре замкнутых контура, проведена оптимизация аналитическим методом с целью определения оптимальных диаметров трубопроводов и получены зависимости целевой функции от диаметров трубопроводов;

– для схемы, содержащей шесть замкнутых контуров, предложен способ приближенного решения задачи потокораспределения тепловой сети.

## Библиографический список

1. Меренков А.П., Хасилев В.Я. Теория гидравлических цепей. М.: Наука, 1985. 278 с.
2. Новицкий Н.Н., Сухарев М.Г., Тевяшев А.Д. и др. Развитие методов теории гидравлических цепей для анализа и синтеза свойств трубопроводных систем как объектов управления // Трубопроводные системы энергетики: математическое моделирование и оптимизация. Новосибирск: Наука, 2010. С. 58–73.
3. Токарев В.В., Шалагинова З.И. Методика многоуровневого наладочного расчета теплогидравлического режима крупных систем теплоснабжения с промежуточными ступенями управления // Теплоэнергетика. 2016. № 1. С. 71–80.
4. Токарев В.В. Разработка методики секционирования кольцевых тепловых сетей закрытых систем теплоснабжения // Теплоэнергетика. 2018. № 6. С. 84–94.
5. Алексеев А.В., Новицкий Н.Н. Современное состояние и опыт применения ИВС «АНГАРА» для решения задач проектирования, эксплуатации и диспетчерского управления системами водоснабжения // Трубопроводные системы энергетики: Математические и компьютерные технологии интеллектуализации. Новосибирск: Наука, 2017. С. 340–353.
6. Vasant P., Voropai N.I. Sustaining power resources through energy optimization and engineering. Hershey, PA: Engineering Science Reference (of IGI Global), 2016. DOI:10.4018/978-1-4666-9755-3
7. Якшин С.В. Метод расщепления графа и принцип аддитивности тепловой сети // Вестник ИргТУ. 2017. Т. 21. № 4. С. 127–138. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-4-127-138.
8. Todini E., Pilati S. A gradient algorithm for the analysis of pipe networks // Computer Applications in Water Supply. L.: John Wiley & Sons, 1988. Vol. 1. P. 1–20.
9. Review of optimization models for the design of polygeneration systems in district heating and cooling networks / J. Ortiga, J.C. Bruno, A. Coronas, I.E. Grossman; ed. by V. Plesu, P.S. Agachi // 17th European Symposium on Computer Aided Process Engineering. ESCAPE 17. Elsevier, 2007.
10. Wang Jinda, Zhou Zhigang, Zhao Jianing A method for the steady-state thermal simulation of district heating systems and model parameters calibration // Energy Conversion and Management. 2016. V. 120. P. 294–305.
11. Static study of traditional and ring networks and the use of mass flow control in district heating applications / Maunu Kuosa, Kaisa Kontu, Tapio Makila, Markku Lampinen, Risto Lahdelma // Applied Thermal Engineering. 2013. V. 54. № 2. P. 450–459.
12. Стенников В.А., Соколов Д.В., Барахтенко Е.А. Методический подход к оптимизации параметров сложных теплоснабжающих систем на основе многоуровневой декомпозиции модели // Трубопроводные системы энергетики: математические и компьютерные технологии интеллектуализации. Новосибирск: Наука, 2017. С. 247–257.
13. Хасилев В.Я. Обобщенные зависимости для технико-экономических расчетов тепловых и других сетей // Теплоэнергетика. 1957. № 1. С. 28–32.
14. Пеньковский А.В. Стенников В.А. Поиск равновесия спроса и предложения на конкурентном рынке тепловой энергии // Трубопроводные системы энергетики: Математические и компьютерные технологии интеллектуализации. Новосибирск: Наука, 2017. С. 293–307.



### References

1. Merenkov A.P., Khasilev V.Ya. *Teoriya gidravlicheskix cepei* [Theory of hydraulic circuits]. Moscow: Nauka Publ., 1985, 278 p. (In Russian)
2. Novitsky N.N., Sukharev M.G., Tevyashev A.D. *Razvitiye metodov teorii gidravlicheskix cepei dlya analiza i sinteza svoystv truboprovodnykh sistem kak ob'ektov upravleniya* [Development of hydraulic circuit theory methods for the analysis and synthesis of pipeline system properties as controlled objects]. *Truboprovodnye sistemy energetiki: matematicheskoe modelirovaniye i optimizatsiya* [Pipeline Power Systems: Mathematical Modeling and Optimization]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2010, pp. 58–73. (In Russian)
3. Tokarev V.V., Shalaginova Z.I. Technique of multilevel adjustment calculation of the heat-hydraulic mode of the major heat supply systems with the intermediate control stages. *Teploenergetika*. [Thermal Engineering], 2016, no. 1, pp. 71–80. (In Russian)
4. Tokarev V.V. Development of a sectionalizing procedure for ring heat networks of closed heat supply systems. *Teploenergetika* [Thermal Engineering], 2018, no. 6, pp. 84–94. (In Russian)
5. Alekseev A.V., Novitsky N.N. *Sovremennoye sostoyaniye i opit primeneniya IVS "ANGARA" dlya resheniya zadach proektirovaniya, ekspluatatsii i dispetcherskogo upravleniya sistemami vodosnabzheniya* [Current state and experience of using "ANGARA" computer system for solving the problems of design, operation and dispatch control of water supply systems]. *Truboprovodnye sistemy energetiki: Matematicheskie i kompyuternie tekhnologii intellektualizatsii* [Pipeline Power Systems: Mathematical Modeling and Optimization]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2017, pp. 340–353. (In Russian)
6. Vasant P., Voropai N.I. *Sustaining power resources through energy optimization and engineering*. Hershey, PA: Engineering Science Reference (of IGI Global), 2016. DOI: 10.4018/978-1-4666-9755-3
7. Yakshin S.V. The method of graph splitting and the principle of heating network additivity. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2017, vol. 21, no. 4, pp. 127–138. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-4-127-138. (In Russian)
8. Todini E., Pilati S. A gradient algorithm for the analysis of pipe networks // *Computer Applications in Water Supply*. L.: John Wiley & Sons, 1988, vol. 1, pp. 1–20.
9. Review of optimization models for the design of polygeneration systems in district heating and cooling networks / J. Ortiga, J.C. Bruno, A. Coronas, I.E. Grossman; ed. by V. Plesu, P.S. Agachi // *17th European Symposium on Computer Aided Process Engineering*. ESCAPE 17. Elsevier, 2007.
10. Wang Jinda, Zhou Zhigang, Zhao Jianing A method for the steady-state thermal simulation of district heating systems and model parameters calibration. *Energy Conversion and Management*. 2016, vol. 120, pp. 294–305.
11. Static study of traditional and ring networks and the use of mass flow control in district heating applications / Maunu Kuosa, Kaisa Kontu, Tapio Makila, Markku Lampinen, Risto Lahdelma. *Applied Thermal Engineering*. 2013, vol. 54, no. 2, pp. 450–459.
12. Stennikov V.A., Sokolov D.V., Baraxtenko E.A. *Metodicheskiy podkhod k optimizatsii parametrov slozhnix teplosnabzhauschix sistem na osnove mnogourovnevnoy dekompozitsii modeli* [Methodical approach to optimization of complex heat supply system parameters based on multilevel decomposition of the model]. *Truboprovodnye sistemy energetiki: Matematicheskie i kompyuternie tekhnologii intellektualizatsii* [Pipeline Power Systems: Mathematical Modeling and Optimization]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2017, pp. 247–257. (In Russian)
13. Khasilev V.Ya. Generalized dependences for technical and economic calculations of thermal and other networks. *Teploenergetika* [Heat Engineering], 1957, no. 1, pp. 28–32. (In Russian)
14. Penkovski A.V., Stennikov V.A. *Poisk ravnovesiya sprosa i predlogeniya na konkurentnom rinke teplovoi energii* [Search for a balance between supply and demand in a competitive market of thermal energy]. *Truboprovodnye sistemy energetiki: Matematicheskie i kompyuternie tekhnologii intellektualizatsii* [Pipeline Power Systems: Mathematical Modeling and Optimization]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2017, pp. 293–307. (In Russian)

#### Критерии авторства

Якшин С.В. самостоятельно подготовил рукопись и несет ответственность за плагиат.

#### Authorship criteria

Yakshin S.V. has prepared the manuscript for publication and bears the responsibility for plagiarism.

#### Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

#### Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.



Оригинальная статья / Original article

УДК 678.067.9:678.049

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-10-141-152>

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЦЕЛЕВОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ ЭПОКСИДНЫХ МАТРИЦ И УГЛЕПЛАСТИКОВ НА ИХ ОСНОВЕ НА ТЕМПЕРАТУРУ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ ОТВЕРСТИЙ

© Ф.А. Насонов<sup>1,2</sup>, С.В. Бухаров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Филиал Компании «Сухой» «ОКБ Сухого»,  
125284, Российская Федерация, г. Москва, ул. Поликарпова, 23 А.

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет «Московский авиационный институт»,  
125993, Российская Федерация, г. Москва, Волоколамское ш., 4.

**РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ.** В данной работе проведено изучение влияния модифицирования эпоксидных матриц и углепластиков на их основе на теплофизические параметры процессов механической обработки при образовании отверстий. Поставлена цель изготовить экспериментальные образцы из матриц и экспериментальные панели из углепластиков на основе модифицированных матриц. Необходимо выявить наличие зависимости тепловых эффектов процессов механической обработки от степени модифицирования матриц и углепластиков. **МЕТОДЫ.** Цели данной работы достигаются экспериментальными методами. Эксперимент включал: изготовление экспериментальных панелей (подготовка связующего, жидкофазное совмещение с сухим наполнителем, пропитка и формование вакуум-автоклавным методом); проверку их качества и механических свойств (неразрушающий контроль экспериментальных панелей акустическими методами и стандартные механические испытания); проведение измерения температуры резания при образовании отверстий образцов из экспериментальных панелей (инфракрасная термография зоны образования отверстий). **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Наименьшее тепловыделение для матричных образцов зафиксировано в интервалах 0.1...0.3 % масс. в зависимости от типа применяемого инструмента. Для углепластиковых образцов на основе модифицированных матриц пики наименьшего тепловыделения смещаются в диапазон 0.2...0.5 %. Снижение максимумов температур в этих диапазонах объясняется антифрикционными свойствами модификатора стеарат цинка: снижаются коэффициент и силы трения. Дальнейшее повышение концентрации модификатора приводит к восстановлению или даже превышению тепловых эффектов относительно исходных немодифицированных матриц и углепластиков (0 % стеарат цинка), что предположительно можно объяснить снижением эффективности резания при пониженных коэффициентах трения. Смещение пиков вправо и некоторое их «уширение» для углепластиковых образцов, вероятно, связано с теплофизическими свойствами наполнителя, которые изменяют условия теплоотвода из зоны контакта трущихся тел (деталь и обрабатываемый инструмент). На практике представляет интерес именно углепластик, как композиционное сочетание матрицы и углеродного наполнителя, который, по результатам данных исследований, имеет более выгодные значения тепловых параметров процессов механической обработки. **ВЫВОДЫ.** Показано отсутствие отрицательного влияния модифицирования на механические свойства углепластика на основе модифицированной композиции. Выявлены зависимости тепловых эффектов процессов механической обработки при формировании отверстий в образцах от концентрации СЦ, что подтверждает эффективность модифицирования.

**Ключевые слова:** эпоксидные углепластики, модификатор стеарат цинка, пропитка под давлением, автоклавное формование, инфракрасная термография.

**Информация о статье.** Дата поступления 26 мая 2018 г.; дата принятия к печати 28 сентября 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 октября 2018 г.

<sup>1</sup>Насонов Федор Андреевич, аспирант, инженер-технолог 1 категории Научно-исследовательского отделения Технологии «ОКБ Сухого», e-mail: [nasonovf2006@mail.ru](mailto:nasonovf2006@mail.ru)

Fedor A. Nasonov, Postgraduate student, 1 Category Technical Engineer of the Sukhoi Design Bureau Research Department, e-mail: [nasonovf2006@mail.ru](mailto:nasonovf2006@mail.ru)

<sup>2</sup>Бухаров Сергей Викторович, доктор технических наук, профессор кафедры технологии композиционных материалов, конструкций и микросистем, e-mail: [bukharovsv@mail.ru](mailto:bukharovsv@mail.ru)

Sergey V. Bukharov, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Technology of Composite Materials, Structures and Microsystems, e-mail: [bukharovsv@mail.ru](mailto:bukharovsv@mail.ru)



**Формат цитирования.** Насонов Ф.А., Бухаров С.В. Исследование влияния целевого модифицирования эпоксидных матриц и углепластиков на их основе на температуру в зоне резания при образовании отверстий // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 10. С. 141–152. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-141-152

## STUDYING THE EFFECT OF SPECIAL MODIFICATION OF EPOXY MATRICES AND EPOXY MATRIX-BASED CARBON FIBER COMPOSITES ON THE TEMPERATURE IN THE CUTTING ZONE UNDER HOLE FORMATION

F.A. Nasonov, S.V. Bukharov

Branch of the Sukhoi Company Sukhoi Design Bureau,  
23A, Polikarpov St., Moscow, 125284, Russian Federation  
Moscow Aviation Institute (National Research University),  
4, Volokolamskoe shosse, Moscow, 125993, Russian Federation

**ABSTRACT. PURPOSE.** The paper studies the effect of the special modification of epoxy matrices and epoxy matrix-based polymer composites on thermophysical parameters of machining processes under hole formation. A goal is set to produce experimental samples from matrices and experimental panels from carbon fiber plastics based on modified matrices. It is necessary to reveal whether there is any dependence of machining process thermal effects on the modification degree of matrices and carbon fiber plastics. **METHODS.** Experimental methods are used to achieve the purposes of this work. The experiment includes: production of experimental panels (binder preparation, liquid-phase combination with a dry filler, impregnation and vacuum-pressure oxidation molding); checking of their quality and mechanical properties (non-destructive testing of experimental panels by acoustic methods and standard mechanical tests); measurement of the cutting temperature under hole drilling in the sample made of experimental panels (infrared thermography of the hole formation zone). **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** It has been determined that the matrix samples feature the lowest heat release in the intervals from 0.1 to 0.3% wt depending on the type of the tool used. The peaks of the lowest heat release of the matrix-based carbon plastic samples are shifted to the range from 0.2 to 0.5%. The decrease in the maximum temperature in these ranges is due to the antifriction properties of the zinc stearate modifier: the coefficient and friction forces are reduced. Further increase in the modifier concentration leads to the recovery or even excess of the thermal effects relative to the initial unmodified matrices and carbon fiber plastics (0 % zinc stearate). This fact can presumably be explained by the decrease in cutting efficiency at reduced friction coefficients. The shifts of the peaks to the right and their “widening” for carbon fiber plastic samples is probably related to the thermophysical properties of the filler, which change the conditions of heat removal from the contact zone of friction bodies (a part and a processing tool). It is the carbon fiber plastic that is of some practical interest being a composite combination of a matrix and a carbon filler, which demonstrates more advantageous values of the thermal parameters of machining processes according to the study results. **CONCLUSIONS.** It has been shown that modification does not have any negative effect on the mechanical properties of modified composition-based carbon plastic. The dependences of the thermal effects of the machining processes under the hole formation in the samples on zinc stearate modifier concentration have been revealed. This fact proves the effectiveness of modification.

**Key words:** epoxy carbon fiber plastic, zinc stearate modifier, pressure impregnation, pressure oxidation molding, IR thermography

**Information about the article.** Received May 26, 2018; accepted for publication September 28, 2018; available online October 31, 2018.

**For citation.** Nasonov F.A., Bukharov S.V. Studying the effect of special modification of epoxy matrices and epoxy matrix-based carbon fiber composites on the temperature in the cutting zone under hole formation. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 10, pp. 141–152. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-141-152. (In Russian)

### Введение

Материаловедческий подход к решению проблем достижения высоких технологических и эксплуатационных качеств конструкций из полимерных композиционных

материалов является одним из главных при создании новых материалов или совершенствовании уже созданных. Одним из типичных примеров такого подхода можно



назвать, например, целевое модифицирование эпоксидных матриц и композитов на их основе. Так, в работах [1, 2] в качестве целевого модификатора использовано поверхностно-активное вещество (ПАВ) стеарат цинка, которое широко применяется в технологии пластмасс и армированных пластиков в качестве антиадгезионной и антифрикционной добавки, в качестве «внутренней смазки» в процессе переработки стеклопластиков методом пултрузии при получении профильных изделий для снижения трения между стенками рабочей камеры пултрудера и материала, находящегося в вязкотекучем состоянии, для снижения «ломки» волокон наполнителя при прохож-

дении при высоком давлении профилирующей головки пултрудера в практически отвержденном виде, а также для снижения адгезионного взаимодействия между материалом и рабочими металлическими поверхностями пултрудера и профилирующего инструмента.

В данной работе предлагается применять данную добавку с целью улучшения условий механической обработки уже отформованного пластика. Проводится исследование влияния целевого модифицирования на теплофизические показатели процессов при образовании отверстий методами механической обработки в деталях из углепластика.

### Цель исследования

Поставлена цель изготовить экспериментальные образцы из матриц и экспериментальные панели из углепластиков на основе модифицированных матриц. Необ-

ходимо выявить наличие зависимости тепловых эффектов процессов механической обработки от степени модифицирования матриц и углепластиков.

### Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования выступает полимерный композиционный материал – углепластик – на основе компонентов: эпоксидная смола ЭД-20 в системе с отвердителем ПЭПА (полиэтиленполиамин), модификатор стеарат цинка (СЦ)<sup>3</sup>, однонаправленный углеволокнистый наполнитель в виде ленты углеродной марки Porcher 14535. Особо стоит подчеркнуть, что в качестве матричного материала («модельное связующее») выбрано достаточно хорошо изученное связующее на основе ЭД-20+ПЭПА, широко применяемое в аэрокосмической отрасли и по сей день, но именно в качестве компонентов клеев, вспенивающихся заполнителей и т.д. При создании новых материалов и их модифицировании непременно должны использоваться совре-

менные и перспективные высокотехнологичные матричные системы сложных составов с выдающимися эксплуатационными характеристиками.

Непосредственно после добавления модификатора в заданных диапазонах концентраций от 0 до 5,0% масс. в смолу ЭД-20, для улучшения его распределения образцы композиций обрабатывали в ультразвуковой ванне мощностью 50 Вт в течение 15 мин. Совмещение композиций и наполнителя производили жидкофазным способом (нанесение и полив в заданных количественных соотношениях) [3], пропитку и последующее формование образцов проводили вакуум-автоклавным способом. Режим пропитки и формования были назначены в соответствии с типовыми технологическими

<sup>3</sup>ТУ 2432-011-10269039-2013 Цинка стеарат. Введен 31-05-2013. Москва: Техэксперт, 2013. / TU 2432-011-10269039-2013 Zinc stearate. Introduced 31 May 2013. Moscow: Techexpert, 2013.



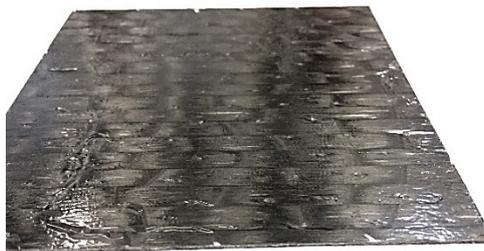
параметрами (по «горячему режиму») для связующего системы ЭД-20+ПЭПА<sup>7</sup> [3–6]. Изготовленные панели прошли для подтверждения качества неразрушающий контроль акустическим импедансным методом с помощью импедансного дефектоскопа ДАМИ-С08 с преобразователем типа ПАДИ-8 в соответствии с ПИ 1.2.171-81. Для подтверждения механических свойств из дан-

ных панелей были изготовлены и испытаны на испытательной машине Instron 10T образцы на растяжение<sup>4</sup>, сжатие<sup>5</sup>, межслоевой сдвиг<sup>6</sup>. Для снятия тепловых эффектов при механической обработке в обрабатывающем центре с числовым программным управлением (ЧПУ) использован инфракрасный тепловизор с функцией записи модели Flir ThermoCAM.

### Результаты исследования и их обсуждение

В предыдущих работах [2, 6] было проведено исследование влияния модифицирования системы ЭД-20+ПЭПА и углепластика на его основе на основные технологические свойства (вязкость связующего, смазывающая способность, приспособленность качественной пропитки волокон наполни-

теля, кинетические параметры реакции отверждения и пр.). Проведен неразрушающий контроль опытных панелей и сняты основные механические свойства углепластика на основе модифицированной матрицы. Общий вид фрагмента изготовленной панели представлен на рис. 1.



**Рис. 1. Фрагмент отформованной экспериментальной панели (количество слоев – 10, схема армирования – 0°/90°)**

**Fig. 1. Fragment of the experimental molded panel ( number of layers – 10, reinforcement pattern – 0°/90°)**

<sup>4</sup>ГОСТ 25.601-80. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания плоских образцов на растяжение при нормальной, повышенной и пониженной температурах. Введ. 1981-07-01. Постановление Государственного комитета СССР по стандартам от 27 августа 1980 г. № 4448. М.: Стандартиформ, 2005. / GOST 25.601-80. Calculations and strength tests. Mechanical testing methods of composite materials with a polymer matrix (composites). Method for testing flat specimens for tensile stress at normal, elevated and low temperatures. Introduced 1 July 1981. Resolution of the USSR State Committee on Standards of 27 August 1980 No. 4448. Moscow: Standartinform, 2005.

<sup>5</sup>ГОСТ 25.602-80 Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на сжатие при нормальной, повышенной и пониженной температурах. Введ. 1981-07-01. Постановление Государственного комитета СССР по стандартам от 27 августа 1980 г. № 4449. М.: Стандартиформ, 2005. / GOST 25.602-80 Calculations and strength tests. Methods of mechanical testing of composite materials with a polymer matrix (composites). Compression test method at normal, high and low temperatures. Introduced 1 July 1981. Resolution of the USSR State Committee on Standards of 27 August 1980 No. 4449. Moscow: Standartinform, 2005.

<sup>6</sup>ОСТ 1 90199-75. Материалы полимерные композиционные. Метод определения прочности при сдвиге путем испытания на изгиб. Введ...76-07-01. Москва: СтандартИнформ, 76. 17 с. / OST 1 90199-75. Composite polymer materials. Method of shear strength determination by a bending test. Introduced ... 1 July 1976. Moscow: StandartInform, 76. 17p.

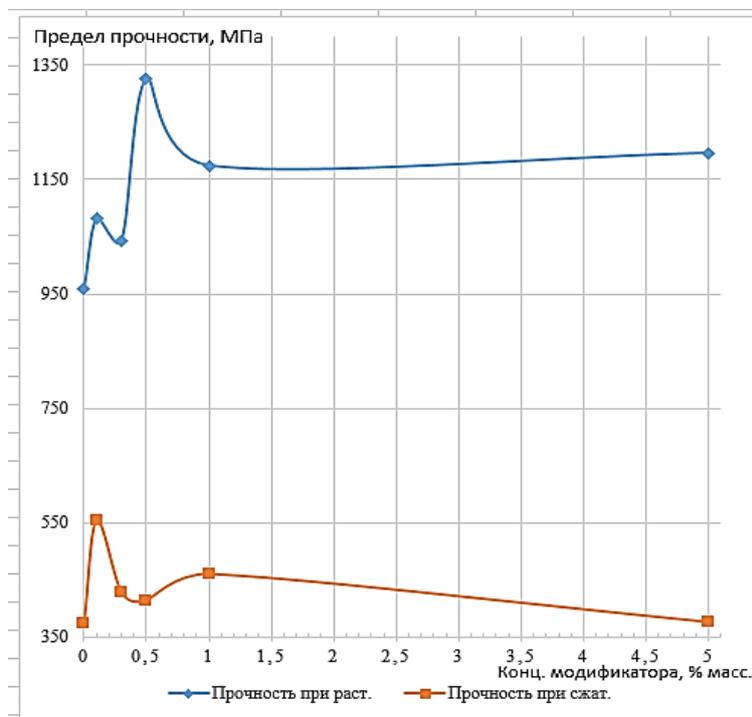
<sup>7</sup>Авиационные материалы: справочник: в 9 т. / под ред. А.Т. Туманова, М.: ОНТИ, 1973. Т. 9. С. 43–56. / Aviation materials: reference book: in 9 volumes / under edition of A.T. Tumanov, Moscow: ONTI, 1973. Vol. 9. P. 43–56.



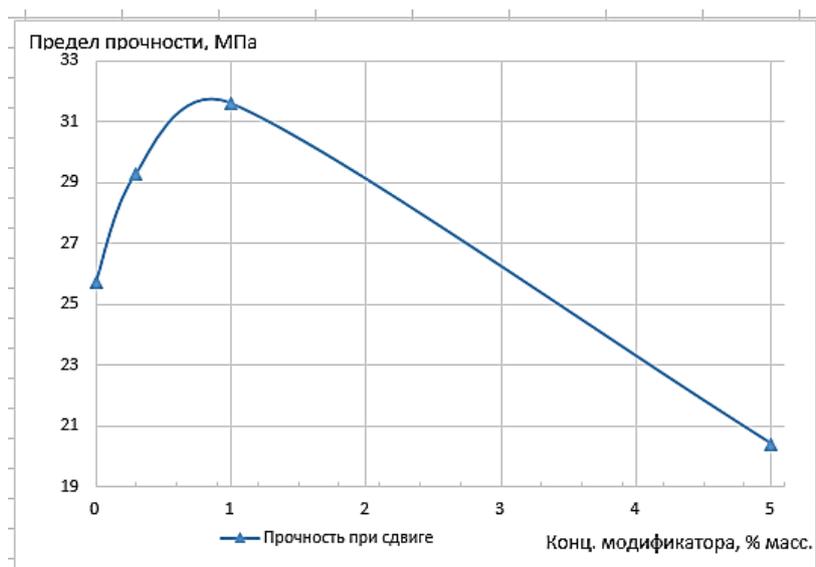
Для подтверждения отсутствия отрицательного влияния модифицирования на механические свойства пластика были испытаны стандартные образцы. Основные механические свойства приведены в графическом

виде на рис. 2–3.

Показано, что модифицирование эпоксидной матрицы и конструкционного углепластика на ее основе, полученного методом пропитки под давлением с последую-



**Рис. 2. Графическая зависимость средних значений прочности образцов из углепластика при растяжении и при сжатии от концентрации модификатора**  
**Fig. 2. Graphical dependence of the mean values of CFRP specimen strengths under tension and compression from modifier concentration**



**Рис. 3. Графическая зависимость средних значений прочности образцов из углепластика при межслоевом сдвиге от концентрации модификатора**  
**Fig. 3. Graphical dependence of the mean values of CFRP specimen strengths under interlaminar shear of modifier concentration**



щим вакуум-автоклавным формованием в диапазоне концентраций 0...5.0% не снижает прочностных показателей для нагрузок типа *растяжение* и *сжатие*. Наблюдается снижение прочности при межслоевом сдвиге при концентрациях, приближающихся к 5%. Для нагрузок типа *растяжение* и *сжатие* наблюдаются максимумы показателей при 0.5 и 0.1–0.3% соответственно.

Для сравнительного анализа тепловых эффектов при механической обработке для образования отверстий был использован метод теплового неразрушающего контроля в режиме реального времени механической обработки образцов.

На механическую обработку образцов в виде пластин с номинальными габаритами из матричных образцов, полученных методом заливки без давления и отформованных образцов из углепластика, была написана управляющая программа обрабатывающего центра с ЧПУ для образования сквозных отверстий с заданными режимами резания (скорость  $N = 1000$  об/мин, подача  $S = 30$  мм/мин). Образование отверстий производилось тремя типами специализированного инструмента: сверло из быстрорежущей стали, фреза торцевая трубчатого типа с алмазным среднезернистым напылением, фреза торцевая из быстрорежущей стали – шпоночная трехзаходная. Воздушное принудительное охлаждение и подача смазывающих охлаждающих жидкостей были отключены. Механическая обработка производилась с открытыми дверями центра при обеспечении выполнения требований техники безопасности.

Реализация температурных измерений при механической обработке материалов представляет собой сложную инженерную задачу, что обусловлено рядом причин. Основными из них являются малые размеры площадок, на которых протекают тепловые процессы, неравномерное распределение температуры по глубине и вдоль поверхностей контактирующих тел, весьма краткий период существования и случайный

во времени и пространстве характер появления единичных тепловых источников [7, 8]. В данном исследовании применен прямой метод бесконтактного измерения температуры ИК-термография [8–15]. Для снятия тепловых эффектов при механической обработке использован инфракрасный тепловизор с функцией записи модели Flir ThermoCAM. Тепловизор был установлен напротив раскрытых дверей обрабатывающего центра по осевой линии механической обработки на стационарном штативе при удалении  $(1000 \pm 50)$  мм от зоны механической обработки.

Линия визирования «видеоискатель – объектив – накерненная метка на образце» была расположена под углом  $(30 \pm 5)^\circ$  (схема на рис. 4). Метки на образцах были нанесены предварительно в соответствии с управляющей программой на глубину 0.5 мм. В образцах (рис. 5) каждый ряд отверстий выполнялся последовательно с выдержкой на воздухе инструмента и заготовке, а также их очистке. Пример моментального снимка тепловой картины приведен на рис. 6. После сверления первого отверстия в ряду инструмент не выдерживался до начальной температуры. До момента пуска сверления запускалась запись тепловой картины с частотой съемки  $1 \text{ с}^{-1}$ .

На рис. 7 и 8 изображены фрагменты испытанных образцов: матричных и углепластиков соответственно.

В табл. 1 и 2 представлены усредненные показатели температурных максимумов в зависимости от вида инструмента и степени модифицирования эпоксидной матрицы. Образцы, значения по которым представлены в табл. 2, изготовлены методом заливки без давления<sup>7</sup> [2, 6]. Образцы углепластиков изготовлены методом пропитки под давлением и формования с использованием вакуум-автоклавного способа<sup>7</sup> [2, 6].

На рис. 9 представлены в графическом виде зависимости температурных максимумов от степени модифицирования и вида инструмента для матричных и углепластиковых образцов.

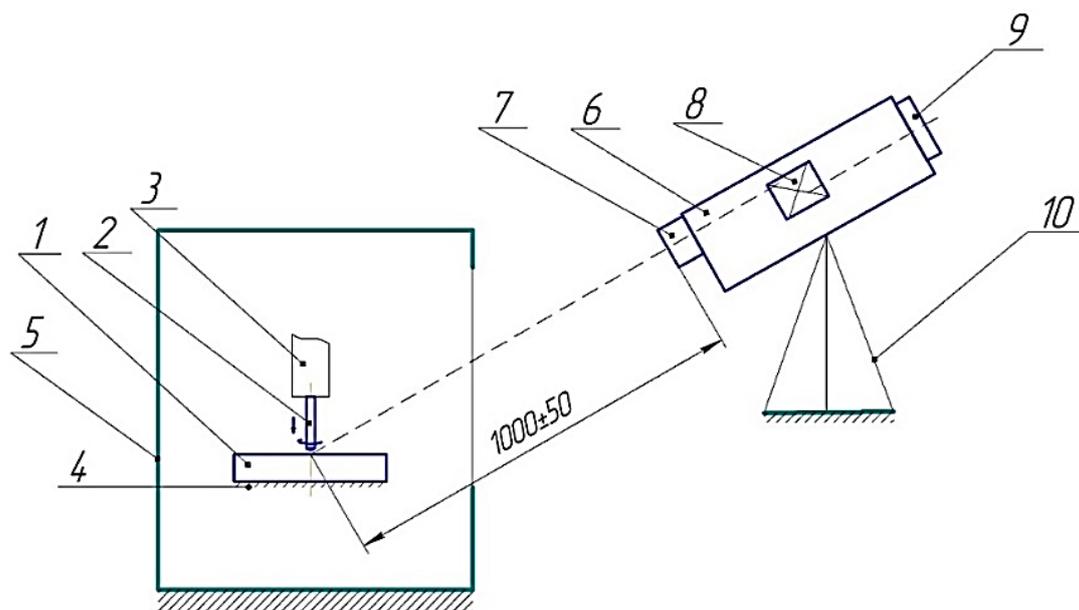


Рис. 4. Схема взаимного расположения обрабатывающего центра – образца – тепловизора:  
1 – образец; 2 – рабочий режущий инструмент; 3 – зажимной патрон; 4 – рабочий стол центра;  
5 – обрабатывающий центр с ЧПУ; 6 – тепловизор; 7 – объектив; 8 – оптико-цифровой преобразователь; 9 – видоискатель; 10 – опора

Fig. 4. Diagram of mutual arrangement of the processing center – sample – thermal imaging device:  
1 – sample; 2 – working cutting tool; 3 – clamping chuck;  
4 – working table of the processing center; 5 – machining center with CNC; 6 – thermal imaging device;  
7 – object lens; 8 – optical-digital converter; 9 – viewfinder; 10 – support

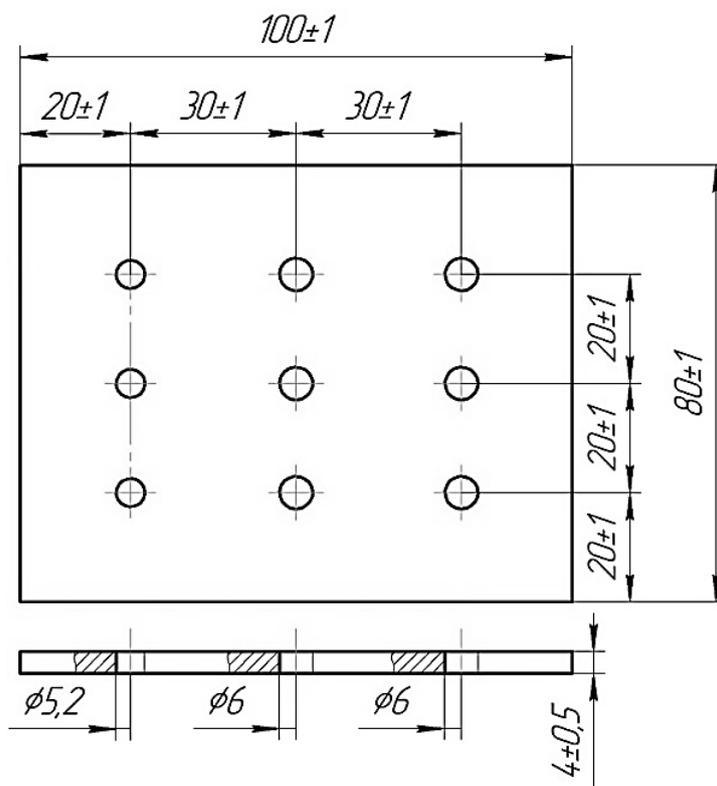
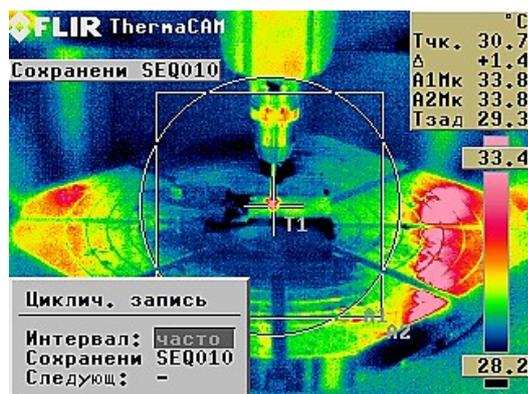


Рис. 5. Эскиз матричного заливочного образца  
Fig. 5. Matrix fill pattern sketch



$T_{зад}$  – значение начальной температуры;

$T_{чк}$  – моментное значение температуры в зоне обработки (под перекрестьем);

$\Delta$  – разница значений  $T_{чк}$  и  $T_{зад}$ .

Рис. 6. Пример моментного снимка тепловой картины процесса образования отверстия методом механической обработки  
Fig. 6. Snapshot example of a hole drilling thermal picture

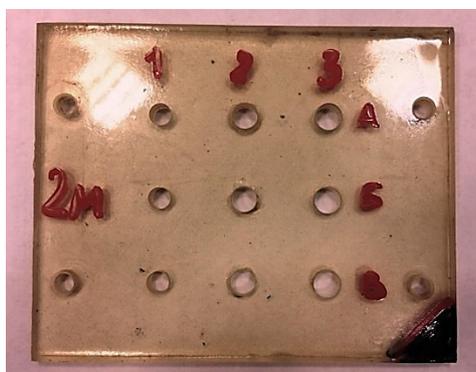


Рис. 7. Пример матричного образца после образования отверстий методами механической обработки: 1 – сверло из быстрорежущей стали,  $\varnothing$  5.2; 2 – фреза трехзаходная,  $\varnothing$  6.0; 3 – фреза торцевая трубчатая с алмазным напылением,  $\varnothing$  6.0; А, Б, В – три последовательных прохода без промежуточного охлаждения

Fig. 7. An example of a matrix sample after hole formation by machining methods: 1 – drill made of high-speed steel,  $\varnothing$  5.2; 2 – triple cutter,  $\varnothing$  6.0; 3 – end tubular cutter with diamond coating,  $\varnothing$  6.0; A, B, B – three successive passes without intermediate cooling

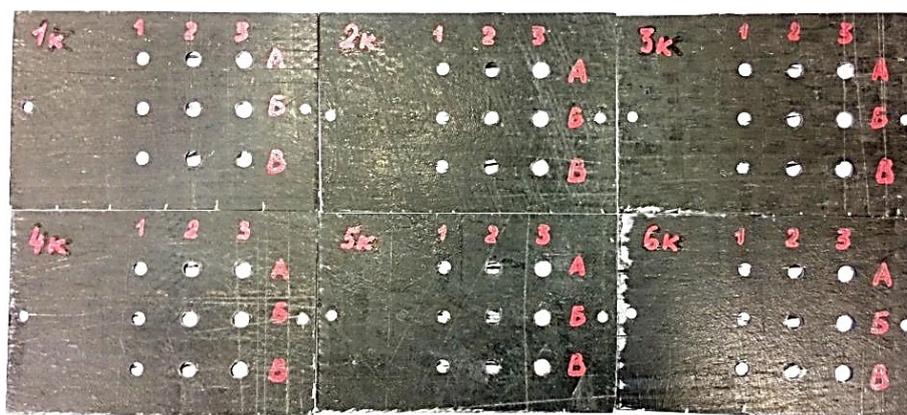


Рис. 8. Серия композитных образцов на основе модифицированных матриц после образования отверстий методами механической обработки: 1 – Сверло из быстрорежущей стали,  $\varnothing$  5.2; 2 – фреза трехзаходная,  $\varnothing$  6.0; 3 – фреза торцевая трубчатая с алмазным напылением,  $\varnothing$  6.0; А, Б, В – три последовательных прохода без промежуточного охлаждения; 1к...6к – номера образцов

Fig. 8. A series of composite samples on the basis of modified matrices after hole formation by machining methods: 1 – drill made of high-speed steel,  $\varnothing$  5.2; 2 – triple cutter,  $\varnothing$  6.0; 3 – end tubular cutter with diamond coating,  $\varnothing$  6.0; A, B, B – three successive passes without intermediate cooling; 1к...6к – sample numbers



Таблица 1

**Усредненные показатели температурных максимумов в зоне сверления в зависимости от вида инструмента и степени модифицирования эпоксидной матрицы**

Table 1

**Average temperature maxima in the drilling area depending on the tool type and epoxy matrix modification degree**

Концентрация модификатора, % масс.	Инструмент		
	Сверло, Ø 5.2	Фреза трехзаходная, Ø 6.0	Фреза торцевая трубчатая с алмазным напылением, Ø 6.0
	Ср. значение температуры*, °С		
	T <sub>макс</sub>	T <sub>макс</sub>	T <sub>макс</sub>
0	52	85	95
0.1	40	83	56
0.2	37	50	60
0.3	38.8	55	65
0.5	45.3	70	80
1.0	51	75	90.6
2.0	56.5	80	90.5
3.0	57	80	92
5.0	59.6	85	84

\*Примечание: среднее значение температур при трех последовательных измерениях. T<sub>зад</sub> = 28–30°C.

Таблица 2

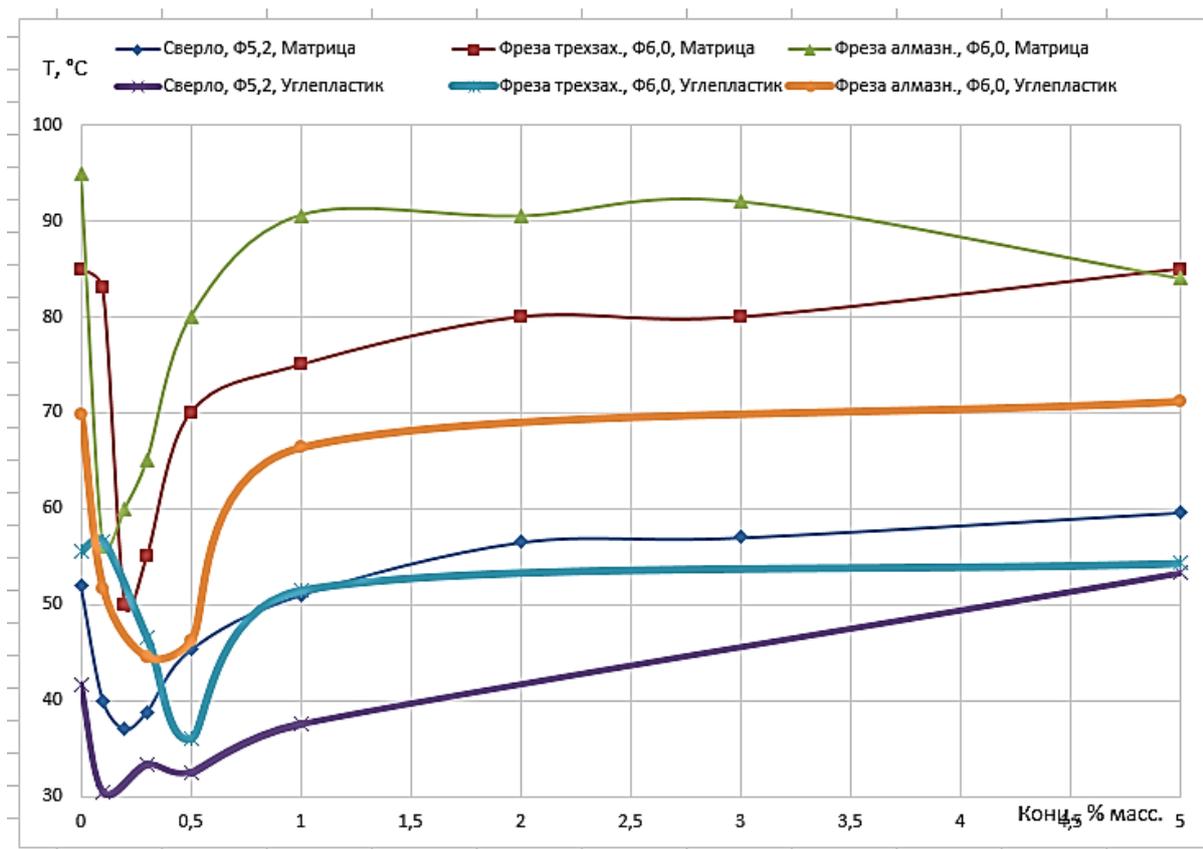
**Усредненные показатели температурных максимумов в зоне сверления в зависимости от вида инструмента и степени модифицирования матрицы эпоксидного углеродистого пластика**

Table 2

**Average temperature maxima in the drilling zone depending on the tool type and modification degree of the epoxy carbon fiber matrix**

Вариант образца	Концентрация модификатора, % масс.	Инструмент		
		Сверло, Ø 5.2	Фреза трехзаходная, Ø 6.0	Фреза торцевая трубчатая с алмазным напылением, Ø 6.0
		Ср. значение температуры*, °С		
		T <sub>макс</sub>	T <sub>макс</sub>	T <sub>макс</sub>
1к	0	41.7	55.6	69.8
2к	0.1	30.5	56.6	51.6
3к	0.3	33.3	46.5	44.5
4к	0.5	32.5	36.1	46.3
5к	1.0	37.5	51.5	66.4
6к	5.0	53.3	54.3	71.2

\*Примечание: среднее значение температур при трех последовательных измерениях. T<sub>зад</sub> = 27–28°C.



**Рис. 9. Графическое представление усредненных (по трем точкам) зависимостей температурного максимума процесса образования отверстий в матричных и углепластиковых образцах. Линии для углепластиков имеют удвоенную толщину начертания**

**Fig. 9. Graphical representation of averaged (by three points) dependences of the temperature maximum of the hole formation process in matrix and carbon fiber samples. Carbon fiber lines are double thick**

Наименьшее тепловыделение для матричных образцов зафиксировано в интервалах 0.1...0.3 % масс. в зависимости от типа применяемого инструмента. Для углепластиковых образцов на основе модифицированных матриц пики наименьшего тепловыделения смещаются несколько правее – в диапазон 0.2 ... 0.5%. Снижение максимумов температур в этих диапазонах объясняется антифрикционными свойствами модификатора СЦ: снижаются коэффициент и силы трения. Дальнейшее повышение концентрации модификатора приводит к восстановлению или даже превышению тепловых эффектов относительно исходных немодифицированных матриц и углепластиков (0% СЦ), что предположительно можно объяснить снижением эффективности резания при пониженных коэффициентах трения. Смещение пиков вправо и некоторое их «уширение» для углепластиковых образцов,

вероятно, связано с теплофизическими свойствами наполнителя, которые изменяют условия теплоотвода из зоны контакта трущихся тел (деталь и обрабатывающий инструмент). На практике представляет интерес именно углепластик, как композиционное сочетание матрицы и углеродного наполнителя, который по результатам данных исследований имеет более выгодные значения тепловых параметров процессов механической обработки. При определенных концентрациях для каждого типа матрицы введение модификатора может служить основой для улучшения условий механической обработки, ее интенсификации и снижения количества наносимых ею микроразрушений. Данное обстоятельство будет влиять на качество образуемых отверстий, на их точность и качество (в т.ч. благодаря снижению термических усадок).



## Заключение

При материаловедческом подходе к изменению физико-механических свойств полуфабрикатов и материалов для переработки в изделия, в частности с помощью модифицирования матриц, необходимо принимать в расчет возможное влияние целевых добавок на механические свойства, которые обуславливают годность материалов к работе в конструкциях с заданными показателями безопасности, качества и надежности.

Показано отсутствие отрицательного влияния модифицирования на механические свойства углепластика на основе модифицированной композиции. Выявлены зависимости температур в зоне резания при механической обработке, при формировании отверстий в образцах от концентрации СЦ, что подтверждает эффективность целевого модифицирования.

## Библиографический список

1. Коротков С.Н., Жовнер Б.А. Исследование методом ДСК антиадгезионных добавок на время отверждения эпоксидных связующих в процессе пултрузии // Пластические массы. 1991. № 5. С. 46.
2. Насонов Ф.А. Исследование эффективности целевого модифицирования углепластика и применения стеклопластиковых втулок при решении проблем микроповреждаемости конструкционных углепластиков при образовании отверстий методами механической обработки. Итоги науки // Избранные труды Всероссийской конференции по новым технологиям. М.: РАН, 2017. Вып. 32. С. 64–78.
3. Мийченко И.П. Технология полуфабрикатов полимерных материалов. СПб.: Изд-во Научные основы и технологии, 2012. С. 120–132.
4. Чернин И.З., Смехов Ф.М., Жердев Ю.В. Эпоксидные полимеры и композиции. М.: Химия, 1982. С. 6–32.
5. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. СПб.: Научные основы и технологии, 2008. С. 124–154.
6. Насонов Ф.А., Алексахин В.М., Мельников Д.А., Бухаров С.В. Исследование модифицирования эпоксидного связующего и углепластика на его основе стеаратом цинка // Клеи. Герметики. Технологии. 2018. № 9. С. 24–31.
7. Ersoy A., Buyuksagic S., Atici U. Wear characteristics of circular diamond saws in the cutting of different hard abrasive rocks // Wear. 2005 (258). С. 1422–1436.
8. Богданович П.Н., Ткачук Д.В., Белов В.М. Методы регистрации температуры при трении и механической обработке твердых тел // Трение и износ. 2006. № 4. С. 444–456.
9. Биленко С.В., Саблин П.А., Леонтьевская Н.К. Использование цветовой пирометрии при измерении стружки при высокоскоростной обработке // Контроль. Диагностика. 2013. № 8. С. 37–43.
10. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. 2-е изд. Москва: Спектр, 2013. 542 с.
11. Глинка В.А. Инфракрасная термография в контроле и диагностике оборудования при механической обработке // Вестник УРАО. 2014. № 3 (71). С. 109–112.
12. Wanigarathne P.C., Kardekar A.D., Dillon O.W., et al. Progressive tool-wear in machining with coated grooved tools and its correlation with cutting temperature // Wear. 2005. (259). P. 1215–1224.
13. Bhushan B. Tribology and Mechanics of Magnetic Storage Devices. New York: Springer Verlag, 1990.
14. Young H.T. Cutting temperature responses to flank wear // Wear. 1996 (201), 117–120.
15. Минкин Ю.Б., Михайлов С.В. Тепловизионный контроль процесса резания материалов // Вестник РГТА. 2011. № 1. С. 83–86.

## References

1. Korotkov S.N., Govner B.A. Study of anti-adhesive additives by the DSK method on epoxy resin curing time under the pultrusion process. *Plasticheskie massy* [Plastic Masses], 1991, no. 5, pp. 46. (In Russian)
2. Nasonov F.A. Study of CFRP target modification efficiency and GRP bushing application when solving the problems of structural carbon plastics microdamage under hole formation by machining methods. Results of science. *Izbrannyye trudy Vserossiyskoy konferentsii po novym tekhnologiyam*. [Selected works of the all-Russian conference on new technologies]. Moscow: Russian Academy of Sciences, 2017, Issue 32, pp. 64–78. (In Russian)
3. Myichenko I.P. *Tekhnologiya polufabrikatov polimernykh materialov* [Technology of semi-finished products of polymeric materials]. Saint-Petersburg: Scientific foundations and technologies Publ., 2012, pp. 120–132. (In Russian)
4. Chernin I.Z., Laughter F.M., Zherdev, Y.V. *Epoksidnye polimery i kompozicii* [Epoxy polymers and compositions]. Moscow: Chemistry Publ., 1982, pp. 6–32. (In Russian).



5. Mikhailin Yu. A. *Konstrukcionnye polimernye kompozicionnye materialy* [Structural polymer composite materials]. Saint-Petersburg: Scientific bases and technologies Publ., 2008, pp. 124–154. (In Russian)
6. Nasonov F.A., Aleksashin V.M., Mel'nikov D.A., Bukharov S.V. Studying the effect of zinc stearate modification of epoxy matrix and epoxy matrix-based carbon plastic on the main technological properties of the compound. *Klei. Germetiki. Tekhnologii* [Problems of Materials Science], 2018, no. 9, pp. 24–31. (In Russian)
7. Ersoy A., Buyuksagic S., Atici U. Wear characteristics of circular diamond saws in the cutting of different hard abrasive rocks. *Wear*, 2005 (258), pp. 1422–1436.
8. Bogdanovich P.N., Tkachuk D.V., Belov V.M. Methods of temperature recording in friction and machining of solids. *Trenie i iznos* [Friction and Wear], 2006, no. 4, pp. 444–456. (In Russian).
9. Bilenko S.V., Sablin P.A., Leontievskaya N.K. Use of color pyrometry at measurement of temperature of shaving at high-speed processing. *Kontrol'. Diagnostika*

#### Критерии авторства

Насонов Ф.А., Бухаров С.В. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

- [Testing. Diagnostics], 2013, no. 8, pp. 37–43. (In Russian)
10. Vavilov V.P. *Infrakrasnaya termografiya i teplovoj kontrol'* [IR-thermography and thermal control]. Moscow: Spectrum Publ., 2013, pp. 542. (In Russian).
11. Glinka V.A. IR-thermography in equipment control and diagnostics under mechanical processing. *Vestnik URAO* [URAO Bulletin], 2014, no. 3 (71), pp. 109–112. (In Russian)
12. Wanigarathne P.C., Kardekar A.D., Dillon O.W., et al. Progressive tool-wear in machining with coated grooved tools and its correlation with cutting temperature. *Wear*. 2005 (259), pp. 1215–1224.
13. Bhushan B. *Tribology and Mechanics of Magnetic Storage Devices*. New York: Springer Verlag, 1990.
14. Young H.T., Cutting temperature responses to flank wear // *Wear*. 1996 (201), pp. 117–120.
15. Minkin Yu.B., Mikhailov S.V. Thermal imaging control of the material cutting process. *Vestnik RGATA* [Vestnik of P.A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University], 2011, no. 1, pp. 83–86. (In Russian)

#### Authorship criteria

Nasonov F.A., Bukharov S.V. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

#### Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.



Оригинальная статья / Original article

УДК 669.553.26:М-94

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-10-153-165>

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ГРАВИТАЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ РУДЫ МЕСТОРОЖДЕНИЯ «ДЖАМГЫР»

© Б.М. Мырзалиев<sup>1</sup>, К.А. Ногаева<sup>2</sup>, М.С. Молмакова<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ОсОО «Vertex Gold Company», Кыргызская Республика, г. Бишкек, б-р Эркиндик, 2.

<sup>2,3</sup>Институт горного дела и горных технологий им. академика У. Асаналиева при Кыргызском государственном техническом университете им. И. Раззакова, Кыргызская Республика, г. Бишкек, пр. Чуй, 215.

**РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ.** В данной работе проведено изучение вещественного состава исследуемой руды месторождения «Джамгыр», расположенной на территории Чаткальского района Джалал-Абадской области Кыргызской Республики и определена целесообразность его гравитационного обогащения. Руда относится к кварцевому малосульфидному типу, основным ценным компонентом является золото, содержание которого в среднем составило 8,5 г/т.

**МЕТОДЫ.** Комплексный минералогический анализ выполнялся с использованием рентгенофазового, оптического и микроскопического анализов. Для изучения сульфидных минералов и золота применялась методика избирательного растворения породных минералов. Рентгенофазовый анализ проводился на портативном рентгеновском дифрактометре D2 PHASER (CuK $\alpha$ ) производства Bruker AXS в диапазоне 2 $\theta$  углов от 5 до 80°. Обработка дифрактограмм осуществлялась в программе DIFFRAC.EVA. Качественный рентгенофазовый анализ проводился путем сравнения с дифрактограммами стандартов (ICDD PDF-2). Полуколичественный анализ пробы проводился с использованием программы DIFFRAC.TOPAS по методу Ритвельда. Содержание золота определялось пробирным-атомноабсорбционным анализом на приборе АГЭП-0,1.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Изучением морфологии частиц свободного золота установлено, что крупное золото в основном дендритовидной формы, мелкое золото в форме капли в пирите. По данным гранулометрического распределения золота определено, что доля крупного золота (более 70 мкм) составляет около 70%. Данные фазового анализа показывают, что доля свободного золота составляет 64,37%. На основании изучения руды обосновано использование гравитационного обогащения проведением GRG теста при гидравлическом давлении 25–12 кПа, скорости подачи руды от 1000 г/мин до 400 г/мин, стадийном понижении крупности от 100% 85 мкм до 80% 75 мкм. Дана методика проведения стадийного гравитационного обогащения, проводимая в три этапа на концентраторе Knelson и приведена схема определения GRG теста. Приведены результаты каждого этапа и суммарный результат GRG теста, согласно которому на первом этапе извлекается 19,86% свободного золота, на втором – 35,83% и на третьем – 17,65%, суммарное извлечение составляет 73,34%. **ВЫВОДЫ.** Изучена морфология и раскрываемость золота на концентратах, полученных при гравитации на центробежном сепараторе, установлены степень раскрываемости золота, размеры золотин в I, II, III концентратах, относительные количества свободных золотин. Окончательно определено, что основная форма золотин дендритовидная либо чешуйчатая. Также установлено, что с постадийным уменьшением крупности помола происходит изменение формы золотин, частицы изометричных форм развальцовываются в зерна плоской формы.

**Ключевые слова:** руда, минерал, золото, гравитационное обогащение, класс крупности, извлечение, концентрат, стадия измельчения.

**Информация о статье.** Дата поступления 26 апреля 2018 г.; дата принятия к печати 25 сентября 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 октября 2018 г.

<sup>1</sup>Мырзалиев Бакыт Молдалиевич, начальник отдела технического контроля, e-mail: m.bakyt@mail.ru  
Bakyt M. Myrzaliev, Head of the Technical Control Department, e-mail: m.bakyt@mail.ru

<sup>2</sup>Ногаева Кулжамал Абдраимовна, доктор технических наук, профессор кафедры металлургии и металлургических процессов, e-mail: knogaeva@yahoo.com  
Kulzhamal A. Nogaeva, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Metallurgy and Metallurgical Processes, e-mail: knogaeva@yahoo.com

<sup>3</sup>Молмакова Мира Сапаровна, кандидат технических наук, доцент кафедры металлургии и металлургических процессов, e-mail: molmakova\_m@mail.ru  
Mira S. Molmakova, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Metallurgy and Metallurgical Processes, e-mail: molmakova\_m@mail.ru



**Формат цитирования.** Мырзалиев Б.М., Ногаева К.А., Молмакова М.С. Определение целесообразности гравитационного обогащения руды месторождения «Джамгыр» // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 10. С. 153–165. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-153-165

## DETERMINATION OF JAMGYR DEPOSIT ORE GRAVITY CONCENTRATION FEASIBILITY

**B.M. Myrzaliev, K.A. Nogaeva, M.S. Molmakova**

ООО «Vertex Gold Company»,  
2, Erkindik Boulevard, Bishkek, Kyrgyz Republic.  
Institute of Mining and Mining Technologies after the Academician U. Asanaliev  
at the Kyrgyz State Technical University after I. Razzakov,  
215, Chui pr., Bishkek, Kyrgyz Republic

**ABSTRACT. PURPOSE.** The paper studies the material composition of the ore from the Jamgyr deposit located in the Chatkal region of the Jalal-Abad district of the Kyrgyz Republic and determines the expediency of its gravity concentration. The ore belongs to the quartz low sulfide type. Its main valuable component is gold, the content of which averages 8.5 g/t. **METHODS.** Complex mineralogical analysis was performed using X-ray phase, optical and microscopic analyzes. Sulphide minerals and gold were studied using the method of selective dissolution of natural minerals. X-ray phase analysis was carried out on a portable X-ray diffractometer D2 PHASER (CuK $\alpha$ ) of Bruker AXS design in the range of 2 $\theta$  angles from 5 to 80°. The obtained diffractograms were processed in the DIFFRAC.EVA program. A qualitative X-ray phase analysis was performed via comparison of standards (ICDD PDF-2) and diffractograms. A semiquantitative analysis of the sample was carried out using the DIFFRAC.TOPAS program according to Rietveld method. The content of gold was determined on the atomic absorption multielement spectrometer AGEP-0,1 by the assay atomic absorption analysis. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** Having studied the morphology of particles of free gold, we have found that the shape of coarse gold is mainly dendritic, small-size gold has the shape of a drop in pyrite. The data on the granulometric distribution of gold show that the percentage of coarse gold is about 70%. The phase analysis data show that the percentage of free gold is 64.37%. The ore study has allowed to substantiate the use of gravity concentration through the GRG test at a hydraulic pressure of 25–12 kPa, ore feed rates from 1000 g/min to 400 g/min, stage-by-stage reduction in size from 100% of 85  $\mu$ m to 80% of 75  $\mu$ m. The technique of performing the stage-by-stage gravity concentration conducted in three stages on Knelson concentrator is given and the GRG test determination diagram is presented. The results of each stage and the total result of the GRG test are provided. According to the GRG test result 19.86% of free gold is extracted at the first stage, 35.83% – at the second stage, and 17.65% – at the third stage. The total recovery is 73.34%. **CONCLUSIONS.** The morphology and release of gold on the concentrates obtained by gravitation on a centrifugal separator are studied. The degree of gold release is determined as well as the gold grain size in I, II, III stage concentrates and relative amounts of free gold grains. The final determination is given to the main shape of gold grains: it is either dendritic or flake. It is also noted that stage-by-stage decrease in the grind size causes changes in the gold grain shape: the particles of isometric forms are expanded into flat grains.

**Keywords:** ore, mineral, gold, gravity concentration, size class, extraction, concentrate, grinding stage

**Information about the article.** Received April 26, 2018; accepted for publication September 25, 2018; available online October 31, 2018.

**For citation.** Myrzaliev B.M., Nogaeva K.A., Molmakova M.S. Determination of Jamgyr deposit ore gravity concentration feasibility. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 10, pp. 153–165. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-153-165. (In Russian).

## Введение

Постоянный рост потребностей промышленности и развитие горно-металлургической отрасли требует непрерывного увеличения добычи и переработки полезных ископаемых. Поэтому вовлечение в переработку плохо изученных, не разработанных месторождений является актуальным [1] при разработке технологий обогащения руд

новых месторождений, таких как Ширальджин, Иштамберды, к ним предъявляются жесткие экологические требования. В связи с этим наиболее предпочтительным является использование гравитационных технологий извлечения благородных металлов с применением современных гравитационных оборудований [2, 3], способных обеспечить



высокие степени концентрации ценных компонентов, безопасность ведения процесса и благоприятное состояние окружающей среды [4]. Технологические свойства золотосодержащих руд определяются гранулометрической характеристикой самородного золота, его минеральными ассоциациями [5] и характером сростания с другими минералами, а также состоянием поверхности. Немаловажную роль при разработке технологий обогащения играет морфология частиц самородного золота и характер размещения в пределах вмещающих пород [6]. Известно, что хуже всего раскрываются частицы золота неправильных форм и их агрегаты – комковатые, дендритообразные, амебообразные, спутанные сетчатые и удлиненные частицы, а также все разновидности мелкого и тонкого золота, для которых необходимо измельчение руды до класса -0,2 мм, -0,074 мм, а в отдельных случаях даже до класса -0,043 мм. Сложные развитые по-

верхности такого золота образуют механически прочные агрегаты с зернами породообразующих и сульфидных минералов, которые не всегда разрушаются при измельчении, а иногда упрочняются путем заклепывания золотин [6]. Поэтому каждое месторождение золота, каждый тип руды в технологическом плане требуют индивидуального подхода [7], поскольку минералогический состав, размеры золотин и строение золотосодержащих пород и руд определяют их прочность и способность к измельчению и истиранию. Поэтому необходим индивидуальный подход при создании технологических схем гравитационного обогащения золота из руд в концентраты в каждом конкретном случае [8].

Целью работы является изучение вещественного состава исследуемой руды месторождения «Джамгыр» и определение целесообразности его гравитационного обогащения.

### Объект и методы исследований

Объектом исследований является кварцево- и малосульфидная руда месторождения «Джамгыр» (Кыргызская Республика). Основным ценным компонентом является золото, содержание которого в среднем, составляет 8,5 г/т. Для технологических исследований была сформирована проба массой: -412,18 кг кл. -2+0 мм; 145,24 кг кл. -10+0 мм.

Комплексный минералогический анализ выполнялся с использованием рентгенофазового, оптического и микроскопического анализов. Для изучения сульфидных минералов и золота применялась методика избирательного растворения породных минералов [9–11]. Рентгенофазовый анализ

проводился на портативном рентгеновском дифрактометре D2 PHASER (CuK $\alpha$ ) в диапазоне углов от 5 до 80°. Обработка дифрактограмм осуществлялась в программе DIFFRAC.EVA. Качественный рентгенофазовый анализ проводился путем сравнения с дифрактограммами стандартов (ICDD PDF-2). Полуколичественный анализ пробы проводился с использованием программы DIFFRAC.TOPAS по методу Ритвельда. Содержание золота определялось пробирным методом, атомноабсорбционным анализом на приборе АГЭП-0,1. Химический анализ сформированной пробы руды месторождения представлен в табл. 1.

Таблица 1

### Химический анализ сформированной пробы руды месторождения

Table 1

#### Chemical analysis of the formed ore sample of the deposit

Наименование пробы	Содержание, г/т по химическому анализу	
	Au	Ag
Д2 -2+0	9.66	4.43
Д1 -2+0	8.68	3.23
Д1 -10+0	9.08	3.96



**Методика проведения GRG теста.** GRG тест проводился на пробе руды массой 50 кг, с помощью лабораторного концентратора Knelson (ЛКС) [12]. Процесс происходит в три этапа (рис. 1). На первом этапе руда массой 50 кг дробилась до крупности 100% класса – 850 мкм, на следующих двух этапах обрабатывались хвосты от предыдущего этапа после доизмельчения. Второй этап включал в себя измельчение 25 кг руды до крупности 50% 75 мкм, а на третьем этапе хвосты 12,5 кг размалывались до крупности 75 мкм 80% мкм. Тесты на концентраторе Knelson проводились при более низкой скорости подачи руды и гидравлическом давлении разжижения для обеспечения более точной подачи, обычно от 1000 г/мин при 25 кПа на первом этапе до 400 г/мин при 12 кПа на третьем этапе. Это соответствует оптимальным показателям, которые были определены при обширных испытательных работах, как с золотой рудой, так и с синтетическими материалами [13].

Тест оптимизирован и выдает максимальное количество гравитационно-извлекаемого золота (GRG). На каждом этапе все концентраты полностью и 1000 г хвостов просеивались на ситах с размером ячеек от 20 до 800 мкм. Частицы хвостов более 100 мкм дополнительно измельчаются перед выполнением пробирного анализа. Пробы всех классов крупности концентратов и хвостов после сушки подвергались пробирному анализу. Стадиальное извлечение золота оценивалось по данным пробирного анализа концентратов и хвостов на каждом этапе.

Гравитационное обогащение проводилось стадийно по мере вскрытия золота. В первой стадии измельчения – на разгрузке мельницы полусамои измельчения и во второй стадии – на разгрузке шаровых мельниц – устанавливаются центробежные сепараторы, работающие в замкнутом цикле измельчения каждой стадии рудоподготовки.

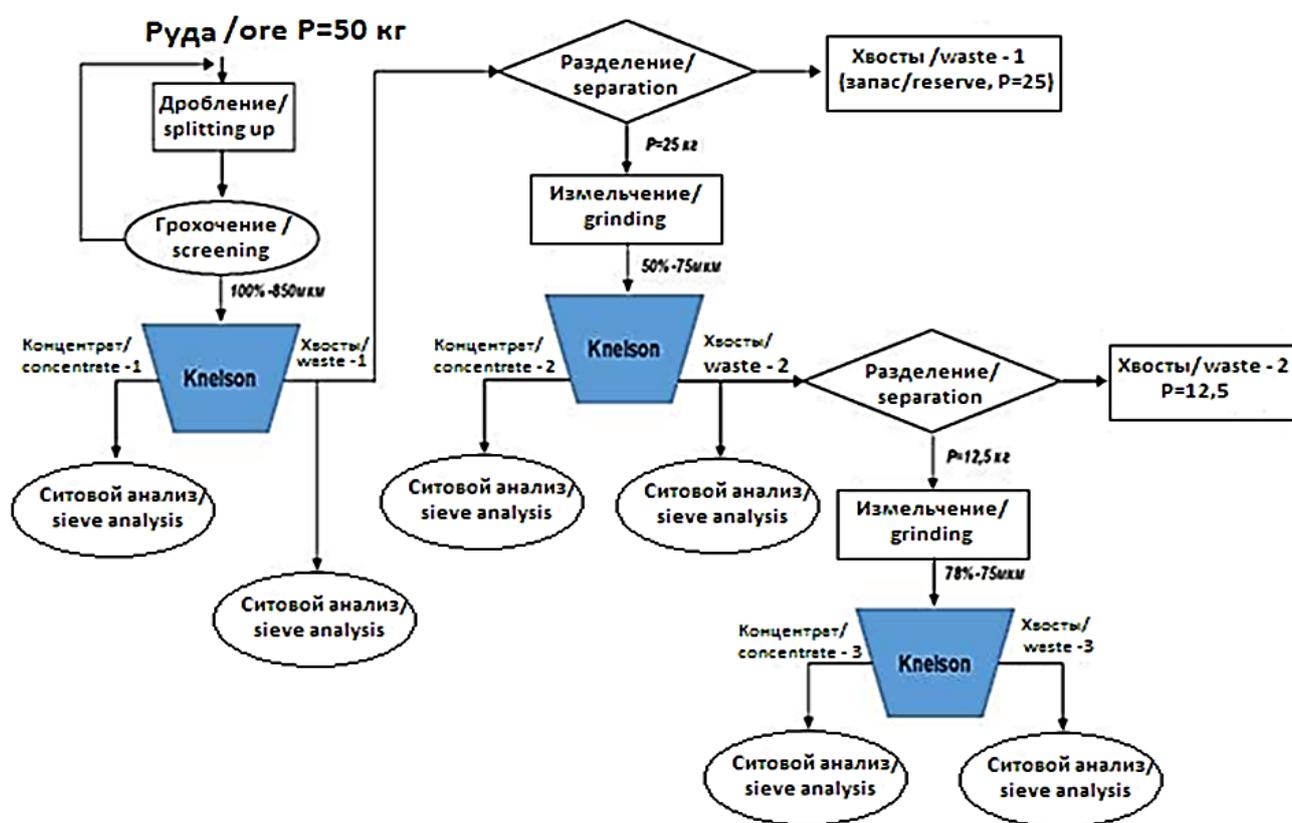


Рис. 1. Схема определения GRG из руды месторождения «Джамгыр» на лабораторном сепараторе Knelson

Fig. 1. Diagram for GRG determination from the Jamgyr deposit ore on the laboratory separator Knelson



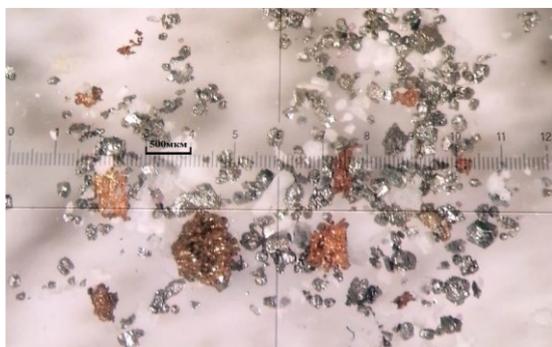
## Результаты исследований и их обсуждение

Исходная малоизученная руда месторождения «Джамгыр» относится к кварцевому мало-сульфидному типу золотосодержащих руд. По минеральному составу исходная проба представлена порообразующими минералами – кварцем, полевыми шпатами (плагиоклаз, ортоклаз), слюдами (мусковит, биотит), карбонатными минералами (кальцит, доломит). Структура кварца катакластическая, гранобластовая, лепидобластовая, брекчиевидная. Для всех образцов кварца характерна трещиноватость. Трещины заполнены карбонатом, серицитом, гидроокислами железа. Суммарная доля сульфидных минералов в исходной пробе не превышает 1%, из которых преобладает пирит. Среди сульфидных минералов также встречается сфалерит, халькопирит, галенит, минералы блеклых руд, арсенипирит. Сульфидные минералы наблюдаются в виде мелких вкраплений и прожилков в массивном кварце, тесно ассоциирующие друг с другом. По химическому составу руда является высоко-кремниевой ( $\text{SiO}_2 - 72,4\%$ ) со значительным содержанием алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3 - 11,9\%$ ), щелочных металлов ( $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} - 5,53\%$ ) и кальция ( $\text{CaO} - 3,40\%$ ). Основным ценным компонентом в исходной пробе является золото, содержание которого после проведенных технологических исследований составило 8,5 г/т.

Золото в руде самородное, разме-

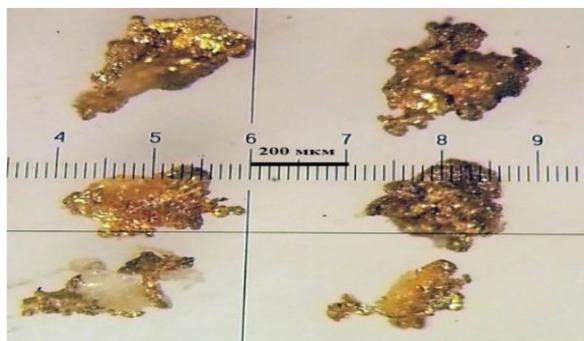
ром от микрона до 1–2 миллиметров, цвет золотин изменяется от светло-желтого до темно-желтого, иногда покрытое охристыми пленками. Крупное золото в основном дендритовидной формы и сростки чешуек, как правило, связано с кварцем и имеет размерность от 50 до 800 мкм. Встречаются также «губчатые» и «скрученные», «проволочко-видные» формы выделения (рис. 2–3). Мелкое золото, как правило, встречается в пирите в виде прожилки шириной 2–10 мкм и включений неправильной формы от 2 до 40 мкм в нерастворенном остатке показали наличие в них тонкого самородного золота. Золото в пирите имеет либо каплевидную форму, либо развивается по трещинам. В пирите по данным электронно-микроскопических исследований содержится до 0,93% золота. Также отмечены весьма тонкие (менее 2 мкм) включения золота в арсенипирите. Подготовка пробы для изучения гранулометрического распределения золота проводилась по методике избирательного растворения породных минералов [14, 15]. На рис. 4 представлен график распределения размеров зерен золота в исходной пробе.

Как видно из графика (рис. 4.), значительная часть (40,9%) золота сосредоточена в классе крупности -100+200 мкм. Доля крупного золота (более 70 мкм) в исходной пробе составляет около 70%. Также присутствует мелкое и тонкодисперсное золото.



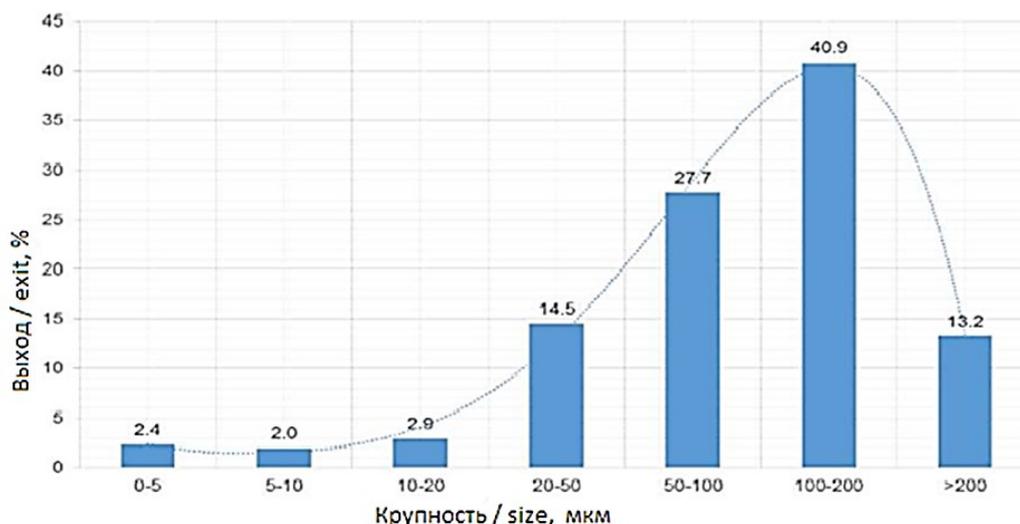
**Рис. 2.** Знаки золота (желтое) и сульфидов (серое) в нерастворенном остатке пробы исходной руды кл.-2+0мм

**Fig. 2.** Signs of gold (yellow) and sulphides (gray) in the undissolved residue of the sample of the initial ore of -2+0 mm class



**Рис. 3.** Крупные золотины различной формы из гравитационного концентрата 1см. Knelson исходной руды кл.-0,8+0мм

**Fig. 3.** Large gold grains of various shapes from Knelson Stage 1 gravity concentrate of the initial ore of -0.8+0 mm class



**Рис. 4. Распределение зерен золота по крупности (по данным электронной микроскопии, 108 шт.) в исходной пробе руды, измельченной до крупности -2+0 мм**  
**Fig. 4. Distribution of gold grains by size (according to electron microscopy, 108 pcs) in the initial ore sample crushed to a particle size of -2+0 mm**

По данным фазового анализа (табл. 2) доля свободного золота в исходной пробе руды (содержание кл. – 74 мкм = 33,9%) составляет 64,37%, из которых незначительную часть (0,83 %) составляют золотины, покрытые окисными пленками. Часть золота (30,32%) находится в сростках, и по данным минералогического анализа сростки золота с породообразующими минералами (в основном с кварцем) составляют 15,9% и 14,4% – с пиритом. Основная форма свободного золота представлена в виде октаэдров и их сростков размером от 25 до 350 мкм (рис. 5, 6). Дендритные формы золота имеют размеры от 325 до 600 мкм. На рис. 7, 8 показаны формы зерен золота в амальгамах.

Изучение морфологии свободного золота показало, что в руде 40,9% приходится на частицы крупностью -100+200 мкм и 13,2% >200 мкм, которые плохо извлекаются традиционными флотационными методами [16]. На этом основывалось применение гравитационных методов, исследования на обогатимость. Суммарные результаты GRG теста представлены в табл. 3.

Результаты стандартного GRG теста (см. табл. 3) показали следующее: из руды дробленной до 100 % класса 0,8 мм извлечлось 19,86 % свободного золота; из хвостов первого цикла после доизмельчения их до

50 % класса 74 мкм извлечлось 35,83 % золота. Суммарное извлечение золота в гравитационный концентрат, полученный после первой и второй стадий измельчения, составило 55,69 %; измельчение хвостов-2 до крупности 78 % класса 74 мкм позволило дополнительно получить гравитационный концентрат-3, содержащий 282,48 г/т золота при извлечении 17,64%; суммарное извлечение золота в три гравитационных концентрата (1+2+3) составило 73,34%.

На рис. 9 красной линией представлена кривая кумулятивного извлечения золота, построенная по результатам изучения морфологии золота [17].

В гравитационные концентраты в процессе стадийного измельчения руды методом центробежной сепарации в лабораторных условиях извлекается как крупное, так и тонкое золото. Кривая гранулометрического состава золота, которое находится в руде и извлекаемое в концентраты сепаратора Knelson совпадают по извлечению до крупности золотинок +300 мкм (рис. 10). Количество свободного золота в руде крупностью +200 мкм составляет 30 %, а максимально извлеченного в концентраты (1+2+3) только 8%. Это наглядно показывает, что гравитационный метод применим только для извлечения достаточно крупного золота изометричной формы.



Таблица 2

Результаты фазового анализа золота и серебра

Table 2

Gold and silver phase analysis results

Наименование проб продуктов обогащения и форма нахождения	Распределение золота	
	г/т	%
Свободное: • с чистой поверхностью	6,1	63,54
• покрытое окисными пленками	0,08	0,83
В сростках: • с чистой поверхностью	2,87	29,90
• покрытое окисными пленками films	0,04	0,42
Ассоциировано: с сульфидными минералами	0,25	2,60
• в том числе с пиритом	0,07	0,73
• с остальными минералами	0,18	1,87
• с породой	0,26	2,71
Исходное содержание	9,60	100,0
Содержание класса – 0,074мм	–	33,9
Содержание класса – 0,044мм	–	25,7

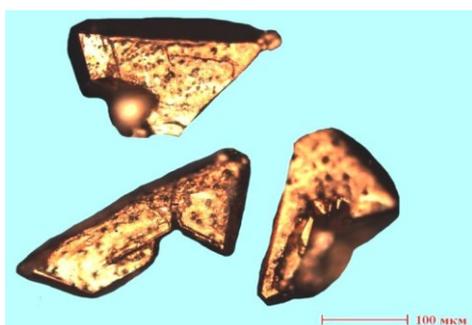


Рис. 5. Свободное золото с чистой поверхностью. Форма золотинок – октаэдры  
Fig. 5. Free gold with a clean surface.  
Gold grains of octahedron shape

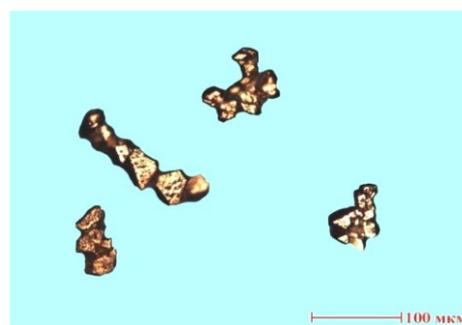


Рис. 6. Свободное золото с чистой поверхностью. Форма золотинок – октаэдры и их сростки  
Fig. 6. Free gold with a clean surface.  
Gold grains of the shape of octahedrons and their intergrowths

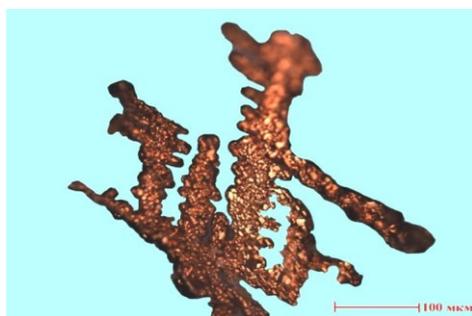


Рис. 7. Свободное золото с чистой поверхностью. Форма золотинок – дендритная  
Fig. 7. Free gold with a clean surface.  
Gold grains of dendritic shape

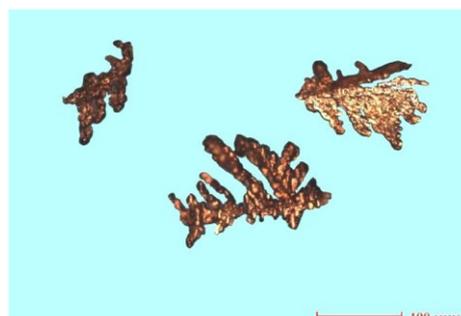


Рис. 8. Свободное золото, покрытое окисными пленками. Форма золотинок – дендритная  
Fig. 8. Free gold coated with oxide films.  
Gold grains of dendritic shape



Таблица 3

Суммарные результаты GRG теста месторождения «Джамгыр»

Table 3

Summary results of the Jamgyr deposit GRG test

Наименование Продукта	Выход, %	Содержание золота, г/т	Извлечение золота от операции, %	Извлечение золота от руды, %
Концентрат 1 Concentrate 1	0,159	1061,48	–	19,860
Хвосты 1 Waste 1	99,841	6,820	–	80,140
Руда Ore	100	8,50	–	100,000
Концентрат 2 Concentrate 2	0,309	985,05	44,71	35,827
Хвосты 2 Waste 2	99,532	3,78	55,29	44,313
Хвосты 1 Waste 1	99,841	6,82	100,00	80,140
Концентрат 3 Concentrate 3	0,531	282,48	39,83	17,649
Хвосты 3 Waste 3	99,001	2,29	60,17	26,664
Хвосты 2 Waste 2	99,532	3,78	100,00	44,313
концентрат 1+2 concentrate 1+2	0,468	1011,02	–	55,690
концентрат 1+2+3 concentrate 1+2+3	0,999	623,78	–	73,339
Хвосты-3 Waste 3		2,29	–	26,661
Руда Ore	100,000	8,50	–	100,000

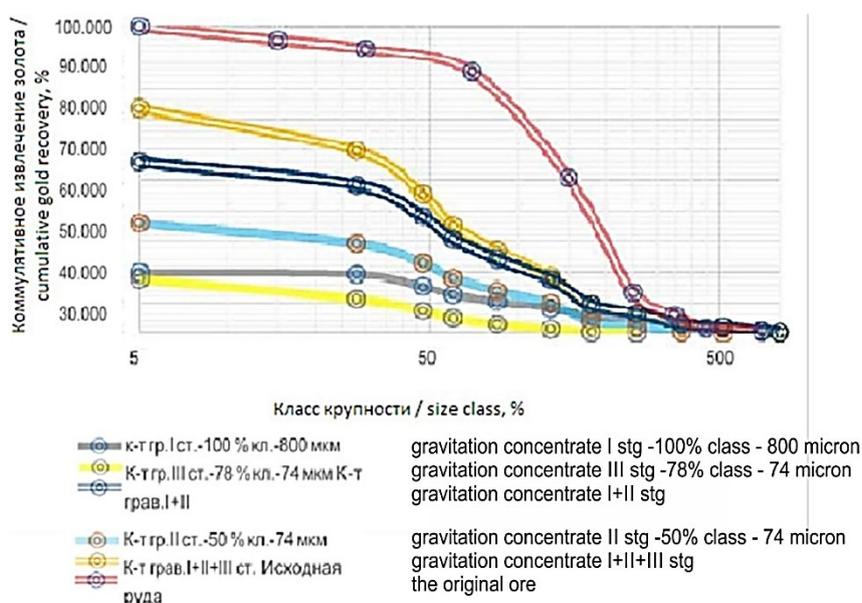
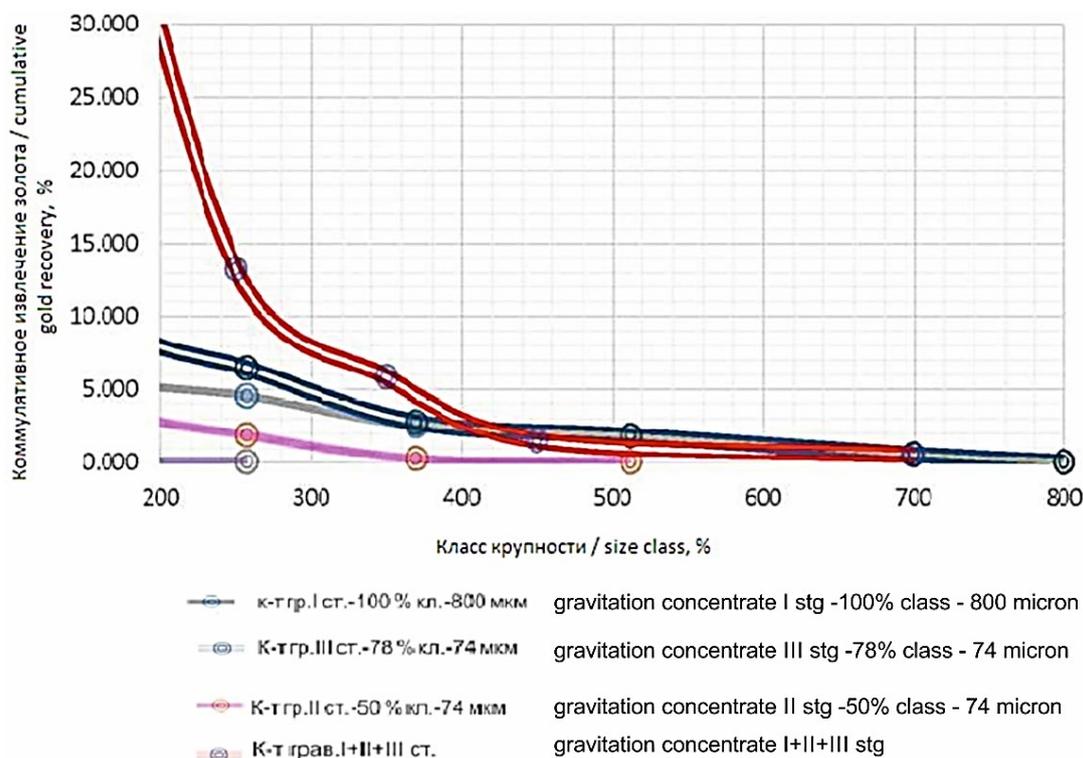


Рис. 9. Распределение золота по классам крупности в гравитационных концентратах на сепараторе Knelson из руды м/я «Джамгыр» после трех стадий измельчения (GRG тест)

Fig. 9. Distribution of gold from the Jamgyr deposit ore by grain size classes in gravity concentrates on Knelson separator after three stages of grinding (GRG test)



**Рис. 10. Распределение крупного золота (+100 мкм) в гравитационных концентратах на сепараторе KNELSON из руды м/я «Джамгыр» после трех стадий измельчения (GRG тест)**  
**Fig. 10. Distribution of coarse gold (+100  $\mu\text{m}$ ) from the Jamgyr deposit ore in gravity concentrates on KNELSON separator after three stages of grinding (GRG test)**

Изучение морфологии и раскрываемости золота при измельчении проводилось на продуктах гравитационного обогащения. Продукты гравитационного обогащения просматривались под бинокулярной лупой, проводилось детальное описание видимого золота. При изучении концентратов определена степень раскрываемости золота, которая начинается уже в классе 425 мкм и при измельчении 33,9% кл. – 71 мкм составляет 64,4% отн. (распределение золота по крупности дано относительно только извлекаемого золота в концентраты и промежуточные продукты). С повышением тонины помола до 70% кл. – 71 мкм количество свободного золота составляет 85% отн. Дальнейшее увеличение тонины помола дает незначительный прирост раскрытия свободного золота. Это связано с наличием тонкого золота, заключенного в сульфидных минералах (пирите и арсенопирите), которое не всегда может быть раскрыто механическими методами. Результаты изучения золота в концентратах, полученных при прове-

дении GRG- теста при стадийном понижении крупности помола приведены в табл. 4 и на рис. 11.

Из рис. 11 и данных табл. 4 видно, что размеры проанализированных золотин изменяются в широком диапазоне крупности от 50 до более 500 мкм. Основная крупность извлеченных золотин составляет от 100 до 400 мкм. Золотины крупнее 400 мкм извлечены на 2,42% только в первый концентрат; в остальных концентратах золота крупнее 400 мкм не обнаружено. Отметим, что для первого концентрата доля свободных зерен Au составляет около 50% отн., остальные золотины находятся в сростках с нерудными минералами (в основном с кварцем). Для второго концентрата доля свободных золотин составляет ~70% отн., а для концентрата, полученного после 3 стадии доизмельчения количество свободных золотин достигает 90% отн. Минералогический анализ концентратов показал, что основная форма выделения золотин дендритовидная либо чешуйчатая или сростки чешуек.



Встречаются скомоканные агрегаты, золотины неправильной формы и сильно уплотненные агрегаты. Также крупные золотины встречаются с включениями оксидов железа, кварца и покрытые охристыми пленками. В процессе изучения свободного золота в гравитационных концентратах сепаратора Knelson (GRG-тест) с постадиальным уменьшением крупности помола отмечено, что происходит изменение формы золотин. Известно, что по мере увеличения

глубины измельчения руд, содержащих свободное золото, происходит их квазиукрупнение, что связано с высокой ковкостью минерала, частицы изометричных форм развальцовываются в зерна плоской формы. Так, в первом концентрате встречены в основном дендритовидные, неправильной формы золотины, в то время, как в третьем концентрате чаще встречаются золотины уплотненной формы, примерно такого же размера (рис. 12).

Таблица 4

Распределение массовой доли золота (%) по крупности (мкм) в гравитационных концентратах GRG-теста

Table 4

Distribution of the mass fraction of gold (%) by grain size ( $\mu\text{m}$ ) in gravity concentrates of the GRG test

Наименование продукта	Распределение массовой доли Au, % по крупности, мкм							Au, %
	0–50	50–100	100–200	200–300	300–400	400–500	>500	
концентрат 1	0.11	0.47	6.03	7.60	3.63	1.17	1.26	20.27
концентрат 2	0.25	3.54	11.52	16.87	4.38	–	–	36.56
концентрат 3	–	1.57	8.93	4.35	3.14	–	–	18.00
суммарный концентрат	0.36	5.58	26.48	28.83	11.15	1.17	1.26	74.83

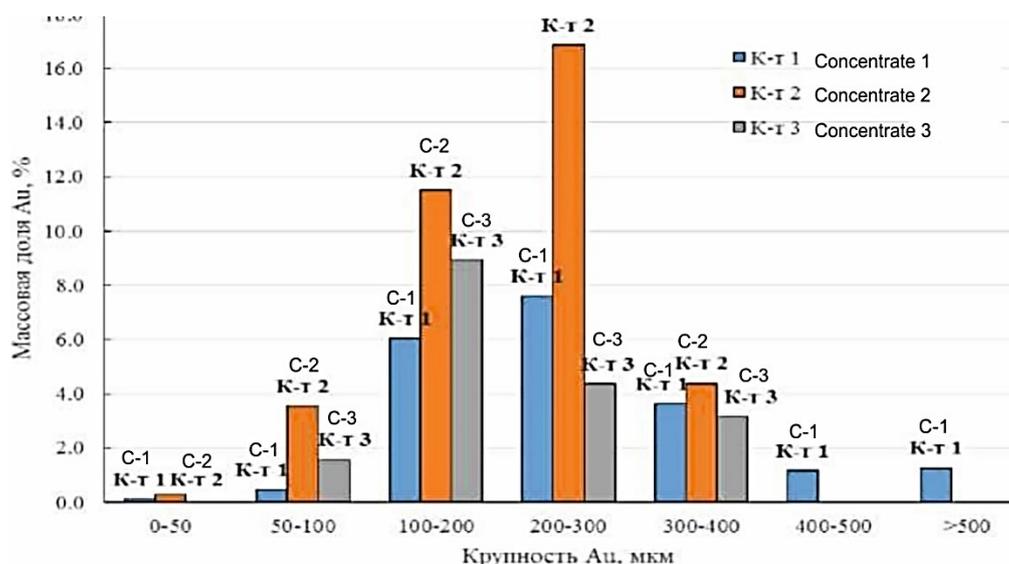
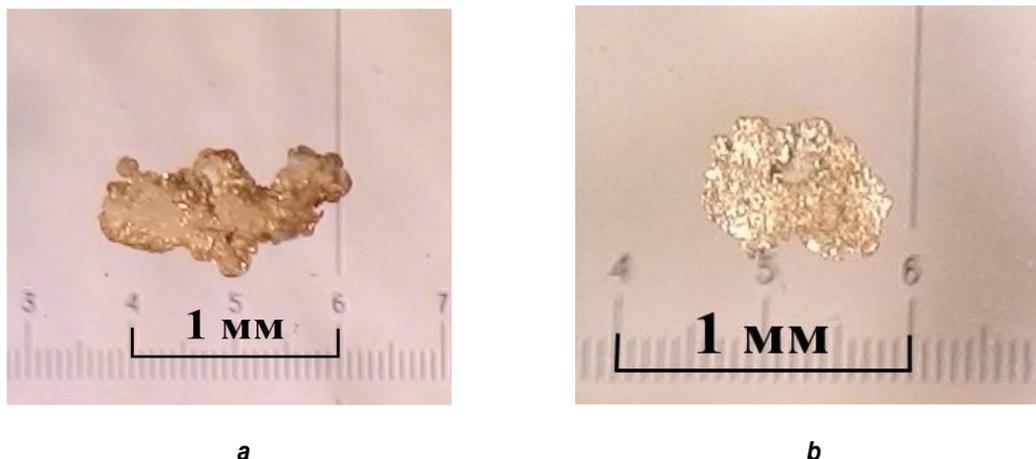


Рис. 11. Распределение видимого (крупнее 70мкм) золота по крупности в гравитационных концентратах GRG-теста (суммарное извлечение золота 74,8%)

Fig. 11. Distribution of visible gold (larger than 70 $\mu\text{m}$ ) by grain size in gravity concentrates of the GRG test (total recovery of gold is 74.8%)



**Рис. 12.** Крупные золотины из гравитационных концентратов, полученных из исходной пробы руды месторождения «Джамгыр»: а – золотины дендритовидной формы из концентрата 1 стадии Knelson; б – уплощенная золотины, «эффект квазиукрупнения» из концентрата 2 стадии Knelson

**Fig. 12.** Large gold grains from gravity concentrates obtained from the initial ore sample of the Jamgyr deposit: а – dendritic gold grain from Knelson Stage 1 concentrate; б – flattened gold grain, the “quasi-integration effect” from Knelson Stage 2 concentrate

### Заклучение

Исходная руда месторождения «Джамгыр» относится к кварцевому мало-сульфидному типу золотосодержащих руд. По химическому составу проба является высококремниевой со значительным содержанием алюминия, щелочных металлов и кальция. Основным ценным компонентом в исходной пробе является золото, по минеральному составу исходная проба представлена породообразующими минералами: кварцем, полевыми шпатами (плагиоклаз, ортоклаз), слюдами (мусковит, биотит), карбонатными минералами (кальцит, доломит). Суммарная доля сульфидных минералов в исходной пробе не превышает 1%, из которых преобладает пирит. Среди сульфидных минералов также встречается сфалерит, халькопирит, галенит, минералы блеклых руд, арсенопирит.

Золото в руде самородное, размером от микрона до 1–2 миллиметров. Крупное золото связано с кварцем и имеет размерность от 50 до 800 мкм. Мелкое золото встречается в пирите в виде прожилки толщиной 2–10 мкм и включений неправильной формы от 2 до 40 мкм, а также отмечены

весьма тонкие (менее 2 мкм) включения золота в арсенопирите.

На продуктах гравитационного обогащения определена степень раскрываемости золота. С повышением тонины помола до 70% класса 71 мкм количество свободного золота составляет 85% отн. Дальнейшее увеличение тонины помола дает незначительный прирост раскрытия свободного золота.

Результаты стандартного GRG теста показали следующее: из руды, дробленной до крупности 100 % класса – 0,8 мм извлеклось 19,86% свободного золота; из хвостов – 1 первого цикла после доизмельчения их до 50 % класса 74 мкм извлеклось 35,83 %. Суммарное извлечение в гравитационный концентрат, полученный после первой и второй стадий измельчения составило 55,69%. Измельчение хвостов – 2 до крупности 78 % класса 74 мкм позволило дополнительно получить гравитационный концентрат 3, содержащий 282,48 г/т золота при извлечении 17,64%. Суммарное извлечение золота в три гравитационных концентрата (1+2+3) составило 73,34%.



Библиографический список

1. Кусков В.Б., Кускова Я.В. Повышение эффективности гравитационного обогащения мелких частиц // Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки минерального сырья: материалы Международ. совещания (г. Томск, 16–19 сентября 2013 г.). Томск, 2013. С. 140.
2. Мырзалиев Б.М., Ногаева К.А., Молмакова М.С. Исследование гравитационного обогащения руды месторождения «Ширальджин» // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. 2016. № 3–1 (39). С. 277–282.
3. Ногаева К.А., Яшук А.А. Исследование гравитационного обогащения руды месторождения Кумбель // Вестник Казахстанско-британского технического университета. 2014. № 1 (28). С. 65–68.
4. Алгебраистова Н.К., Бурдакова Е.А., Макашин А.В., Маркова А.С. Современные гравитационные аппараты для обогащения золота и серебросодержащих руд // Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки минерального сырья. 2013. С. 143–146.
5. Chovan M., Jägersky I., Delaney V. Mineralogy of ore dressing products from Banská Hodruša Au (Ag, Pb, Cu) epithermal deposit // Acta Geologica Slovaca. 2016. Vol. 8. Issue 2. P. 203–216.
6. Петров С.В. Морфология самородного золота и ее влияние на результаты переработки руд // Обогащение руд. 1966. № 2. С. 6–9.
7. Мырзалиев Б.М., Ногаева К.А., Молдобаев Э.С., Сазбаков З.С. Исследование технологических свойств руды месторождения «Ширальджин» // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. 2017. № 6. С. 46–49.
8. Козин Л.Ф. Химия и технология благородных металлов – золота и серебра [Электронный ресурс]. URL: <http://book.lib-i.ru/25fizika/615097-4-1f-kozinhimiya-tehnologiya-blagorodnih-metallov-zolota-serebra-problemi-perspektivi-sirevaya-baza-zolota-serebra.php>
9. Зеленов В.И. Методика исследования золота и серебросодержащих руд. М.: Недра, 1989. С. 302.
10. Меретуков М.А. Золото: химия, минералогия металлургия. М.: Руды и металлы. 2008. С. 528.
11. Матушкина А.Н. Повышение показателей обогатимости тонкодисперсного золота в карбонатно-силикатной золотосодержащей руде // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: материалы Международ. науч.-техн. конф. (г. Екатеринбург, 6–7 апреля 2016 г.). Екатеринбург, 2016. С. 146–149.
12. Laplante A.R., Standardiezd A. Test to Determine Gravity Recoverable Gold // Department of Mining and Metallurgical Engineering, Mc Gill University 3450. Montreal, QC Canada H3A 2A7. P. 1–13.
13. Федотов П.К., Сенченко А.Е., Федотов К.В., Бурдонов А.Е. Исследования обогатимости упорных первичных и смешанных руд золоторудного месторождения Красноярского края // Обогащение руд. 2017. № 3 (369). С. 21–26.
14. Берлинский А.И. Разделение минералов. М.: Недра, 1988. 227 с.
15. Михайлов В.В., Гордиенко В.В. Простейшие лабораторные методы выделения моно-минеральных фракций [Электронный ресурс]. URL: <http://diss.seluk.ru/m-himiya/30003656-1-v-mihaylov-gordienko-prosteyshie-laboratornie-metodi-videleniya-monomineralnih-frakciy-uchebno-metodicheskoe-posobie-sankt-peterburg.php>
16. Бочаров В.А., Игнаткина В.А. Технология обогащения золотосодержащего сырья. М.: Руда и металлы, 2003. 408 с.
17. Мальцев Г.Д., Никанюк Т.С. Морфология золота некоторых гидротермальных месторождений Сибири и Дальнего востока // Известия Сибирского отделения. Секция наук о земле. РАН № 2 (37). 2010. С. 21–27.

References

1. Kuskov V.B., Kuskova Ya.V. Improving efficiency of gravity concentration of small particles. *Innovatsionnyye protsessy kompleksnoy i glubokoy pererabotki mineral'nogo syr'ya: materialy Mezhdunarodnogo soveshchaniya* [Innovative processes of complex and deep processing of mineral raw materials: materials of the International meeting, Tomsk, 16–19 September 2013]. Tomsk, 2013, pp. 140. (In Russian)
2. Myrzaliev B.M., Nogaeva K.A., Molmakova M.S. Research gravity concentration ore "Shiraldzhin". *Izvestiya Kyrgyzskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. I. Razzakova* [Proceedings of the Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov], 2016, no. 3–1 (39), pp. 277–282.
3. Nogaeva K.A., Yashchuk A.A. Study of gravity concentration of Kumbel deposit ore. *Vestnik Kazahstansko-britanskogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Kazakh-British Technical University], 2014, no. 1 (28), pp. 65–68.
4. Algebraistova N.K., Burdakova E.A., Makashin A.V., Markova A.S. Modern gravity devices for gold and silver ore dressing. *Innovatsionnyye protsessy kompleksnoy i glubokoy pererabotki mineral'nogo syr'ya* [Innovative processes of complex and deep processing of mineral raw materials], 2013, pp. 143–146.
5. Chovan M., Jägersky I., Delaney V. Mineralogy of ore dressing products from Banská Hodruša Au (Ag, Pb, Cu) epithermal deposit // Acta Geologica Slovaca. 2016. Vol. 8. Issue 2. P. 203–216.
6. Petrov S.V. Morphology of native gold and its influence on ore dressing results. *Obogachenie rud* [Ore Dressing], 1966, no. 2, pp. 6–9. (In Russian)



7. Myrzaliev B.M., Nogaeva K.A., Moldobaev E.S., Sazbakov Z.S. Study of technological properties of Shirdzhin deposit ore. *Nauka, novye tekhnologii i innovatsii Kyrgyzstana* [Science, New Technologies and Innovations in Kyrgyzstan], 2017, no. 6, pp. 46–49.
8. Kozin L.F. *Himiya i tekhnologiya blagorodnykh metallov – zolota i serebra* [Chemistry and technology of precious metals – gold and silver]. Available at: <http://book.lib-i.ru/25fizika/615097-4-lf-kozin-himiya-tehnologiya-blagorodnykh-metallov-zolota-serebra-problemi-perspektivi-sirevaya-baza-zolota-serebra.php> (accessed 26 June 2018)
9. Zelenov V.I. *Metodika issledovaniya zolota i serebrosoderzhashchih rud* [Research methods of gold and silver ores]. Moscow: Nedra Publ., 1989, pp. 302. (In Russian)
10. Meretukov M.A. *Zoloto: himiya, mineralogiya, metallurgiya* [Gold: chemistry, mineralogy, metallurgy]. Moscow: Rudy i metally Publ., 2008, pp. 528. (In Russian)
11. Matushkina A.N. *Povyshenie pokazatelej obogatimosti tonkodispersnogo zolota v karbonatno-silikatnoj zolotosoderzhashchej rude* [Improving preparation characteristics of fine-dispersed gold in carbonate-silicate gold ore]. *Materialy Mezhdunar. nauch-tekhn. konf. "Nauchnye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogennogo syr'ya"* [Proceedings of International scientific and technical conference "Scientific bases and processing practice of ores and technogenic raw materials, Ekaterinburg, 6–7 April 2016]. Ekaterinburg, 2016, pp. 146–149. (In Russian)
12. Laplante A.R., Standardiezd A. Test to Determine Gravity Recoverable Gold // Department of Mining and Metallurgical Engineering, McGill University 3450. Montreal, QC Canada H3A 2A7. P. 1–13.
13. Fedotov P.K., Senchenko A.E., Fedotov K.V., Burdonov A.E. Research of enrichment of refractory primary and mixed ores of the Krasnoyarsk region gold ore deposit. *Obogashchenie rud* [Ore Dressing], 2017, no. 3 (369), pp. 21–26. (In Russian)
14. Berlinskij A.I. *Razdelenie mineralov* [Mineral separation]. Moscow: Nedra Publ., 1988, 227 p. (In Russian)
15. Mihajlov V.V., Gordienko V.V. *Prostejshie laboratornye metody vydeleniya mono-mineral'nyh frakcij* [The simplest laboratory methods for mono-mineral fraction extraction]. [Electronic resource]. URL: <http://diss.seluk.ru/m-himiya/30003656-1-v-mihaylov-gordienko-prostejshie-laboratornye-metodi-videleniya-monomineralnih-frakcij-uchebno-metodicheskoe-posobie-sankt-peterburg.php> (accessed 26 June 2018)
16. Bocharov V.A., Ignatkina V.A. *Tekhnologiya obogashcheniya zolotosoderzhashchego syr'ya* [Dressing technology for gold-bearing raw materials]. Moscow: Ruda i metally Publ., 2003, 408 p.
17. Mal'cev G.D., Nikanyuk T.S. Gold morphology of some hydrothermal deposits of Siberia and Far East. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya. Sekciya nauk o zemle* [Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits], 2010, no. 2 (37), pp. 21–27.

#### Критерии авторства

Мырзалиев Б.М., Ногаева К.А., Молмакова М.С. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

#### Authorship criteria

Myrzaliev B.M., Nogaeva K.A., Molmakova M.S. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.



Оригинальная статья / Original article

УДК 622:621.879.1

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-10-166-177>

## РАБОТОСПОСОБНОСТЬ АВТОМОБИЛЯ КАМАЗ В УСЛОВИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ

© Г.Ю. Зудов<sup>1</sup>, И.И. Буслаева<sup>2</sup>, М.П. Лебедев<sup>3</sup>, А.И. Левин<sup>4</sup>

Якутский научный центр СО РАН,  
677980, Российская Федерация, г. Якутск, ул. Петровского, 2.

**РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ.** Исследование работоспособности систем автомобиля КамАЗ в суровых природно-климатических условиях криолитозоны. **МЕТОДЫ.** Для обработки информации базы данных по работоспособности автомобилей КамАЗ в температурно-нагрузочных условиях Севера использованы методы математической статистики. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Проведенное исследование отказов основных групп деталей и сборочных единиц автомобилей КамАЗ, эксплуатируемых в условиях Севера, позволило разделить эти системы на типы по признаку чувствительности к низким климатическим температурам. Выделены группы деталей и сборочных единиц, для которых низкие температуры окружающей среды являются доминирующим фактором влияния на их работоспособность; группы, на работоспособность которых низкие температуры влияют наряду с другими эксплуатационными факторами; группы, работоспособность которых слабо зависит от низких температур воздуха. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Выявлены системы и детали, лимитирующие надежность автомобилей КамАЗ в условиях криолитозоны. Исследованы распределения отказов групп деталей и сборочных единиц автомобилей КамАЗ по месяцам года. Для этих групп предложена классификация по степени чувствительности к низким климатическим температурам.

**Ключевые слова:** грузовой автомобиль, отказ, работоспособность, криолитозона, низкие климатические температуры.

**Информация о статье.** Дата поступления 14 июля 2018 г.; дата принятия к печати 19 сентября 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 октября 2018 г.

**Формат цитирования.** Зудов Г.Ю., Буслаева И.И., Лебедев М.П., Левин А.И. Работоспособность автомобиля КамАЗ в условиях криолитозоны // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 10. С. 166–177. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-166-177

## KAMAZ PERFORMANCE IN CONDITIONS OF PERMAFROST REGION

G.Yu. Zudov, I.I. Buslaeva, M.P. Lebedev, A.I. Levin

Yakut Scientific Center SB RAS,  
2, Petrovsky St., Yakutsk, Sakha Republic (Yakutia), 677980, Russian Federation

<sup>1</sup>Зудов Геннадий Юрьевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела ритмологии и эргономики северной техники, e-mail: [zudov@prez.ysn.ru](mailto:zudov@prez.ysn.ru)  
Gennady Yu. Zudov, Candidate of technical sciences, Senior Researcher of the Department of North Machinery Rhythmology and Ergonomics, e-mail: [zudov@prez.ysn.ru](mailto:zudov@prez.ysn.ru)

<sup>2</sup>Буслаева Ирина Ивановна, кандидат технических наук, доцент, заведующая отделом ритмологии и эргономики северной техники, e-mail: [buslajeva@mail.ru](mailto:buslajeva@mail.ru)  
Irina I. Buslaeva, Candidate of technical sciences, Associate Professor, Head of the Department of North Machinery Rhythmology and Ergonomics, e-mail: [buslajeva@mail.ru](mailto:buslajeva@mail.ru)

<sup>3</sup>Лебедев Михаил Петрович, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, председатель ЯНЦ СО РАН, e-mail: [m.p.lebedev@prez.ysn.ru](mailto:m.p.lebedev@prez.ysn.ru)  
Mikhail P. Lebedev, Doctor of technical sciences, Corresponding member of RAS, Chairman of the Yakut Scientific Center of SB RAS, e-mail: [m.p.lebedev@prez.ysn.ru](mailto:m.p.lebedev@prez.ysn.ru)

<sup>4</sup>Левин Алексей Иванович, доктор технических наук, заведующий сектором отдела ритмологии и эргономики северной техники, e-mail: [levin@prez.ysn.ru](mailto:levin@prez.ysn.ru)  
Aleksei I. Levin, Doctor of technical sciences, Head of the Sector of the North Machinery Rhythmology and Ergonomics Department, e-mail: [a.i.levin@prez.ysn.ru](mailto:a.i.levin@prez.ysn.ru)



**ABSTRACT.** The **PURPOSE** of this article is to study the operability of KAMAZ truck systems in severe natural and climatic conditions of the permafrost region. The **METHODS** of mathematical statistics are used to process database information on KAMAZ operability in the temperature-load conditions of the North. **RESULTS.** The conducted study of failures of the main groups of assembly components and parts of KAMAZ trucks operated in the North allowed to classify these systems into the types by sensitivity to low climatic temperatures. We have distinguished the groups of parts and assembly components of KAMAZ truck for which low ambient temperature is the dominant factor influencing their operability; the groups whose operability is affected by low temperatures along with other operational factors; and the groups whose operability is slightly affected by low ambient temperatures. **CONCLUSION.** The systems and parts limiting the performance of KAMAZ trucks in permafrost region have been identified. The study is given to the monthly distributions of failures of KAMAZ part groups and assembly units by months. These groups are classified according to the degree of sensitivity to low climatic temperatures.

**Keywords:** truck, failure, performance, permafrost region, low climatic temperatures

**Information about the article.** Received July 14, 2018; accepted for publication September 19, 2018; available online October 31, 2018.

**For citation.** Zudov G.Yu., Buslaeva I.I., Lebedev M.P., Levin A.I. KAMAZ performance in conditions of permafrost region. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 10, pp. 166–177. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-166-177. (In Russian).

## Введение

Обеспечение работоспособности и надежности технических систем в суровых природно-климатических условиях приобретает особую актуальность в свете интенсивного освоения арктических и северных районов России, что является одной из стратегических задач развития страны. Исправное техническое состояние транспортных средств влияет не только на безопасность транспортировки пассажиров и грузов в экстремальных условиях криолитозоны, но и на вероятность их попадания в аварийную ситуацию [1]. Климат Якутии является одним из самых суровых на планете: его отличительной особенностью являются экстремально низкие температуры воздуха в зимнее время и резкие изменения суточных температур в весенне-осенний период. Ра-

ботоспособность техники, особенно на Севере, представляет собой комплексную проблему, так как технические объекты являются сложными системами, состоящими из большого числа деталей и сборочных единиц, изготовленных из разных материалов, на которые оказывают различное влияние природно-климатические и эксплуатационные факторы. Экстремальные условия эксплуатации техники в криолитозоне характеризуются большим количеством переменных факторов и их сочетаний [2]. Существующие методы оценки работоспособности технических систем не в полной мере учитывают особенности их функционирования на Севере. Целью работы является исследование работоспособности систем автомобилей КамАЗ, эксплуатируемых в природно-климатических условиях криолитозоны.

## Объект и схема исследований

Для исследования нами проводился сбор информации об отказах грузовых автомобилей КамАЗ, эксплуатируемых автотранспортными предприятиями Якутии. Собранные информация после проверки на достоверность, полноту и однородность заносилась в базу данных банка «Техника Севера» ОРЭСТ ЯНЦ СО РАН.

Автомобили КамАЗ являются самыми распространенными в России отечественными грузовыми автомобилями грузоподъемностью от 10 до 40 тонн и эксплуатируются в арктических и северных районах более 40 лет. Эти машины отличает возможность работы при низких климатических температурах и хорошая проходимость, актуальная для грунтовых дорог Якутии. В



базе данных «КамАЗ» банка «Техника Севера» имеется информация о работоспособности 250 автомобилей этой марки, из которых для анализа нами выбрано 50 машин. Основным критерием выбора являлась продолжительность наблюдения не менее 5 лет с начала эксплуатации нового автомо-

биля. Отобранная статистическая информация отсортирована по системам, узлам, группам деталей и сборочных единиц. Эта информация распределена по временным интервалам для оценки влияния климатических температур и продолжительности эксплуатации.

### Исследование работоспособности автомобиля КамАЗ в условиях криолитозоны

**Природно-климатические условия Севера как фактор негативного воздействия на работоспособность автотранспорта.** Для оценки воздействия природно-климатических факторов криолитозоны на работоспособность автомобилей КамАЗ проведен анализ распределения общего количества отказов за выбранный пятилетний период наблюдения по календарным месяцам (рис. 1). Для автомобиля в целом наблюдается возрастание числа отказов в зимнее время по сравнению с летним периодом в два и более раза. Наибольшее количество отказов приходится на холодные месяцы с ноября по февраль, а наименьшее – на теплое время – с мая по июль. Возрастание числа отказов в августе связано с нетемпературными факторами.

При низких температурах внешней среды криолитозоны основная причина отказов автомобилей – хрупкие разрушения металлических деталей и элементов, а также резинотехнических изделий (РТИ). Так, например, степень негативного воздействия фактора низких температур на отказы деталей подвески зависит от сопротивления материала хрупкому разрушению [3, 4]. Кроме того, на работоспособность упругих деталей подвески и неподрессоренных элементов автомобиля существенное влияние оказывает уровень переменных динамических нагрузок, определяемых микропрофилем дороги и жесткостью подвески, и обуславливающих появление усталостных повреждений [5]. Также при низких температурах происходит увеличение вязкости масел,

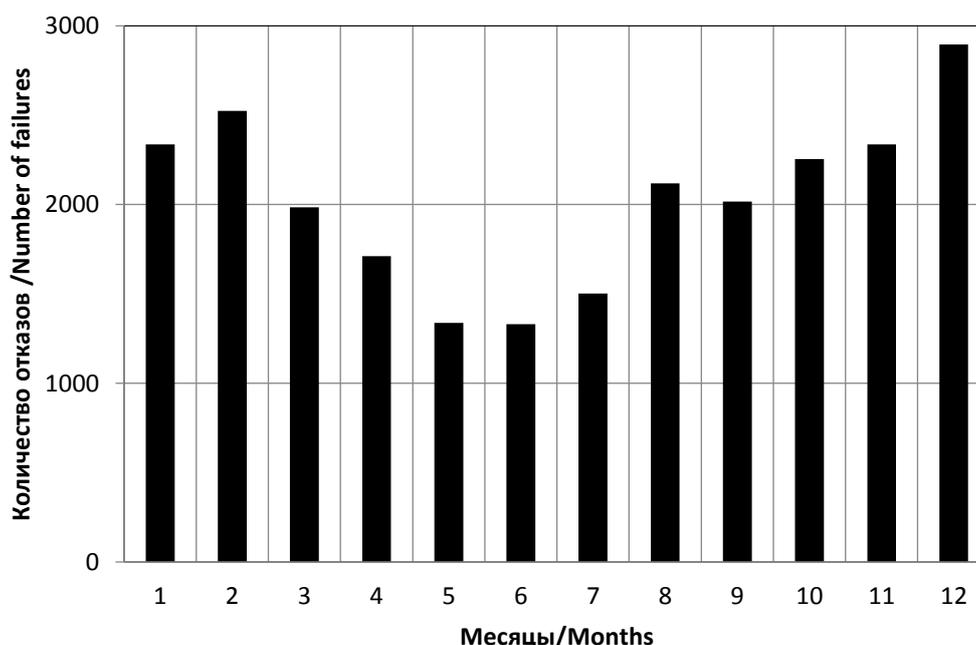


Рис. 1. Распределение количества отказов автомобилей КамАЗ по месяцам  
Fig. 1. Monthly distribution of KAMAZ number of failures



смазок и топлива, обледенение элементов машин, повышение жесткости РТИ [6–8]. Это усложняет условия работы узлов трения, элементов подвески, двигателя и трансмиссии, вызывая увеличение пусковых и рабочих нагрузок на детали автомобиля.

Низкие температуры среды значительно влияют на служебные свойства РТИ – происходит стеклование полимерных материалов, при этом увеличивается модуль упругости материала и резко снижаются его эластичность и пластичность, а в конечном итоге уменьшается срок службы деталей и узлов. Неблагоприятно воздействует на РТИ и влажность воздуха: конденсат, попавший внутрь этих материалов и на их поверхности, при понижении температуры ниже 0°C замерзает, при этом происходит образование частиц льда, что вызывает микроразрушения материала РТИ и обледенение поверхностей. Такие процессы наблюдаются при резком изменении температуры среды, характерном в зимнее время для гаражного хранения автомобилей: влага конденсиру-

ется на элементах машины при заезде в гараж, а затем при выезде из гаража остатки невысохшей влаги замерзают.

*Системы, лимитирующие работоспособность автомобиля КамАЗ в условиях холодного климата.* За пятилетний период наблюдений зафиксировано 24348 отказов выбранных автомобилей. Распределение числа отказов по группам, согласно Каталогу деталей и сборочных единиц автомобилей КамАЗ [9], приведено на рис. 2. Наибольшее количество отказов приходится на тормоза – 3792, электрооборудование – 2721, двигатель – 2535 и подвеску – 2108. Кроме того, более 1000 отказов зафиксировано по системе охлаждения (1361), системе питания (1308) и рулевому управлению (1062). На эти семь систем приходится более 61,1 % всех отказов.

Анализ базы данных показал, что наибольшее число отказов приходится на 11 сборочных единиц и деталей, хотя в общей сложности эти элементы составляют менее 2 % от общего количества сборочных единиц и деталей автомобиля КамАЗ (таблица).

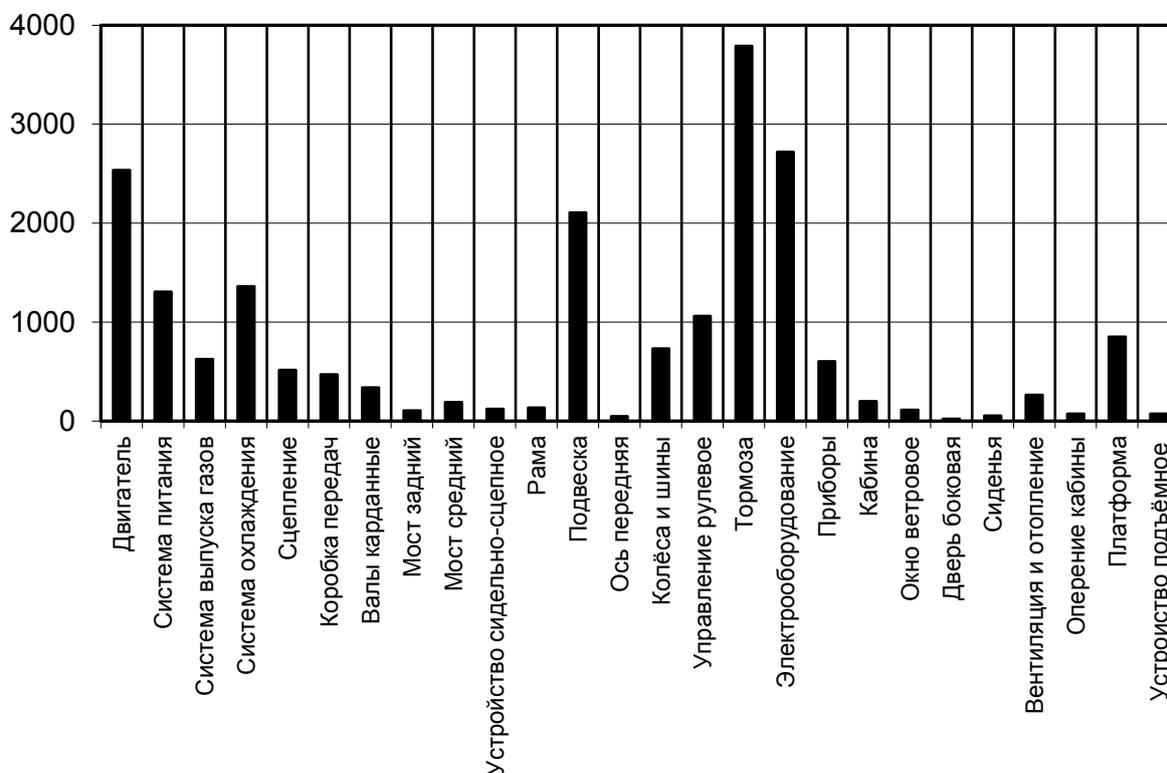


Рис. 2. Распределение числа отказов автомобилей КамАЗ по группам деталей и сборочных единиц  
Fig. 2. Distribution of KAMAZ number of failures by groups of assembly components and parts



**Отказы сборочных единиц и деталей автомобилей КамАЗ**  
**Failures of KAMAZ assembly components and parts**

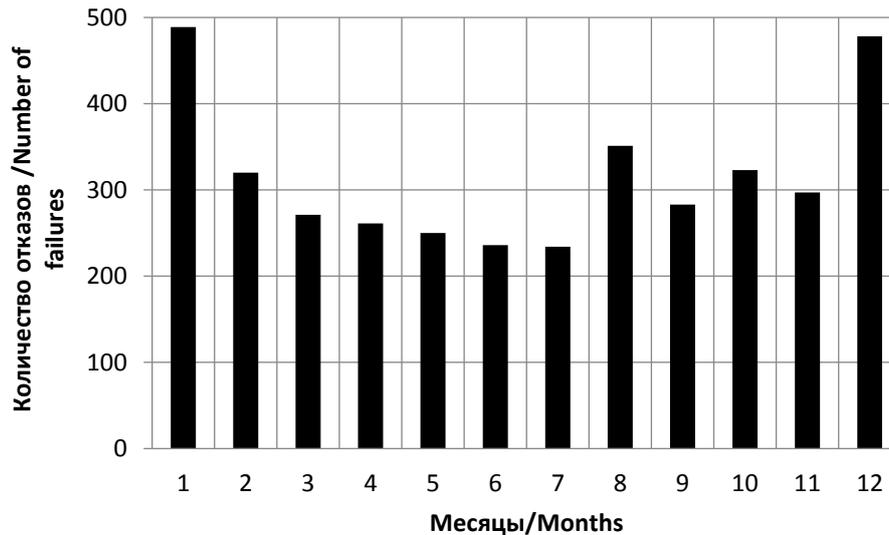
Система автомобиля	Наименование сборочной единицы, детали	Количество отказов сборочной единицы, детали
Тормозная система	Тормозной шланг	682
	Энергоаккумулятор	518
	Воздушные трубки	366
	Компрессор	217
	Сумма отказов указанных деталей / Всего отказов по системе	1783 / 3792
Электрооборудование	Проводка	1882
	Сумма отказов указанных деталей / Всего отказов по системе	1882 / 2721
Подвеска	Рессоры	581
	Реактивная штанга	570
	Сумма отказов указанных деталей / Всего отказов по системе	1051 / 2108
Рулевое управление	Продольная тяга	309
	Поперечная тяга	234
	Гидроусилитель	126
	Насос гидроусилителя	68
	Сумма отказов указанных деталей / Всего отказов по системе	737 / 1062

Из таблицы видно, что отказы каждой сборочной единицы или детали из перечисленных составляют 47 и более процентов всех отказов системы, к которой они относятся. Такое большое количество отказов позволяет отнести их к элементам, лимитирующим работоспособность автомобиля КамАЗ в криолитозоне. Эти сборочные единицы и детали относятся к следующим системам: тормозная система, электрооборудование, подвеска и рулевое управление. Для таких групп сборочных единиц и деталей, как двигатель и его системы охлаждения и питания, следует учитывать повышенную сложность ремонта, нередкое отсутствие необходимых запасных частей в условиях затрудненности поставок в районы Крайнего Севера. Эти факторы увеличивают время простоев автомобилей в ремонте и его трудоемкость. Таким образом, к системам, лимитирующим работоспособность автомобиля КамАЗ в условиях холод-

ного климата, можно отнести тормозную систему, электрооборудование, подвеску, рулевое управление, а также двигатель и его системы охлаждения и питания.

**Распределения по месяцам отказов систем, лимитирующих работоспособность автомобиля КамАЗ.** Для систем, лимитирующих работоспособность автомобиля КамАЗ, построены гистограммы распределения отказов по календарным месяцам.

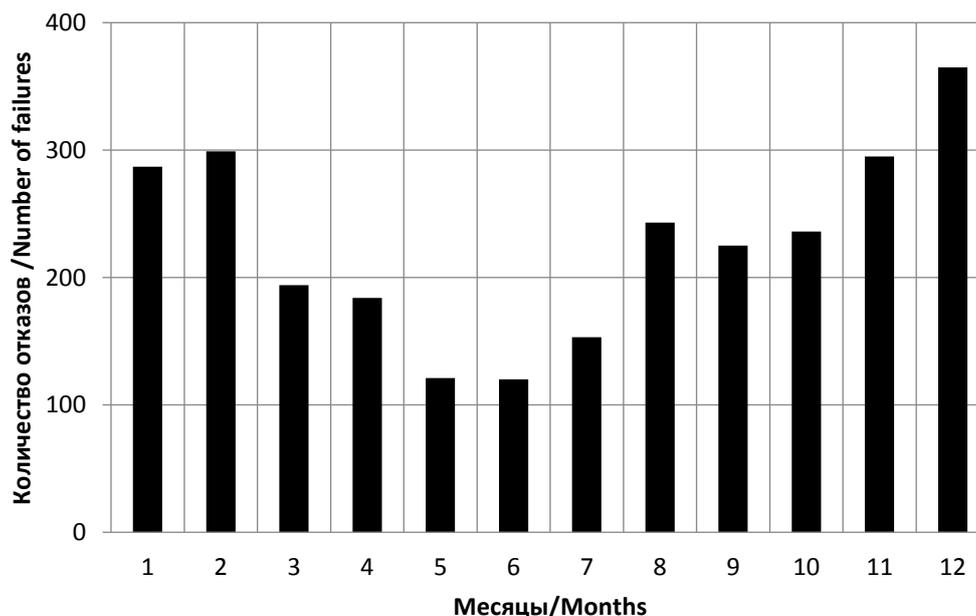
1. *Тормозная система.* На тормозную систему приходится наибольшее количество отказов (18,6 % всех отказов), гистограмма их распределения по месяцам приведена на рис. 3. Число отказов существенно возрастает в наиболее холодные месяцы года в Якутии – декабрь и январь. Это, возможно, связано с тем, что понижение температуры наружного воздуха ниже температуры, критической для работоспособности тормозной системы, наблюдается именно в эти месяцы.



**Рис. 3. Распределение количества отказов тормозной системы автомобиля КамАЗ по месяцам**  
**Fig. 3. Monthly distribution of KamAZ brake system failures**

2. **Электрооборудование.** Распределение по месяцам отказов электрооборудования (13,3 % всех отказов автомобилей КамАЗ) приведено на рис. 4. Количество отказов зимой более чем в три раза превосходит их количество в летнее время, наибольшее число отказов наблюдается в ноябре-феврале, а наименьшее – в мае-июле. Низкие климатические температуры снижают эластичность и пластичность изоляционных ма-

териалов электрооборудования, способствуя их разрушению и увеличивая вероятность электрического пробоя. Также в холодное время при эксплуатации автомобиля происходит увеличение нагрузки на элементы электрооборудования вследствие более интенсивного использования осветительных приборов из-за снижения продолжительности светового дня и электрического подогрева некоторых систем при низких температурах окружающей среды.



**Рис. 4. Распределение количества отказов электрооборудования автомобиля КамАЗ по месяцам**  
**Fig. 4. Monthly distribution of KamAZ electrical equipment failures**



3. *Двигатель.* Наиболее дорогим и трудоемким для ремонта агрегатом автомобиля КамАЗ является двигатель (12,4 % всех отказов). На рис. 5 приведена гистограмма распределения отказов двигателя по календарным месяцам. Неуклонный рост числа отказов отмечается с августа по декабрь, а их среднемесячное число в период с марта по июль практически не меняется. Прослеживается увеличение числа отказов в холодное время более чем в три раза по сравнению с летними месяцами. Отрицательное влияние низких температур воздуха (до  $-60^{\circ}\text{C}$ ) на двигатель связано с изменением теплового режима его работы, увеличением вязкости масла, повышенным сопротивлением трансмиссии и шин, поступлением холодного воздуха и топлива [10]. Повышенная вязкость моторного масла затрудняет пуск двигателя и приводит к его высоким пусковым износам. Увеличивает нагрузку на двигатель повышенное сопротивление трансмиссии автомобиля, происходящее из-за загустения масла в мостах, в коробке передач и повышения жесткости шин [11, 12]. Кроме того, работа двигателя осложняется при поступлении в камеру сго-

рания холодных воздуха и топлива, что вызывает снижение распыления и смесеобразования. Также его работа затрудняется из-за неполного сгорания топлива при длительной работе двигателя на низких оборотах, что характерно для эксплуатации автомобилей на Севере. Конденсация воды при неполном сгорании топлива вызывает коррозионно-механическое изнашивание двигателя, что значительно снижает его ресурс. Не воспламенившееся топливо смывает со стенок цилиндра оставшуюся масляную пленку, что ухудшает триботехнические свойства цилиндро-поршневой группы двигателя, при этом значительно увеличивается скорость изнашивания деталей трения [13].

4. *Системы охлаждения и питания двигателя.* Распределение отказов систем охлаждения и питания аналогично распределению отказов двигателя. Для системы охлаждения (6,6 % всех отказов) их существенный рост наблюдается в период с октября по декабрь, а затем происходит снижение с января-февраля по май. Количество отказов в мае в 3,5 раза меньше, чем в декабре. Для системы питания двигателя

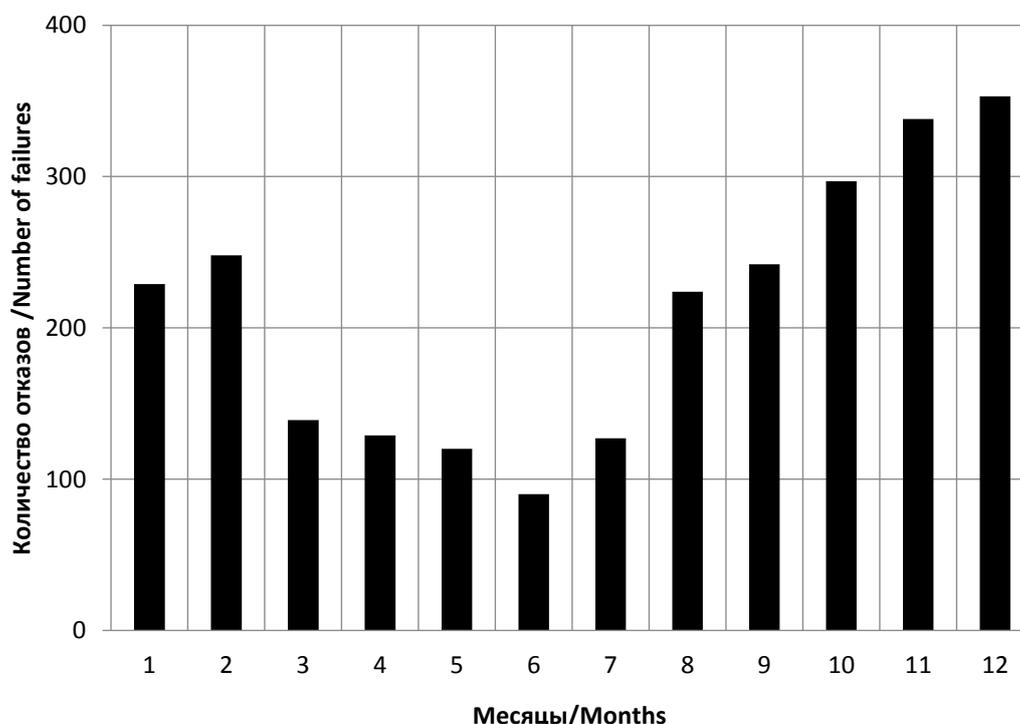


Рис. 5. Распределение количества отказов двигателя автомобиля КамАЗ по месяцам  
Fig. 5. Monthly distribution of KamAZ engine failures



автомобиля КамАЗ (6,4 % всех отказов) количество отказов относительно стабильно с марта по октябрь, а резкий рост отмечается с ноября по декабрь. Низкие температуры топлива ухудшают функционирование фильтров тонкой и грубой очистки, вызывая повышенный износ топливных насосов низкого и высокого давления [14].

5. *Детали подвески.* На рис. 6 приведено распределение отказов деталей подвески (10,3 % всех отказов автомобилей КамАЗ). Их наибольшее количество отмечено с июля по октябрь, т.е. приходится на вторую половину лета и начало осени. В остальное время года отказы подвески распределены практически равномерно. Анализ эксплуатационных повреждений структуры и разрушения рессоры автомобиля КамАЗ выявил роль дорожных условий как значимого деструктивного фактора при работе автотранспорта в криолитозоне [3–5].

6. *Рулевое управление.* Для рулевого управления (5,2% всех отказов) снижение числа отказов происходит с февраля по июль более чем в четыре раза (рис. 7). Наблюдающееся некоторое повышение количества отказов рулевого управления в ав-

густе, сентябре и октябре может быть связано с влиянием дорожных факторов. Более 50% отказов рулевого управления приходится на две детали (таблица) – продольную и поперечную тяги, на которые воздействуют динамические нагрузки, возникающие при движении автомобиля по неровностям дороги. Качество дорог в криолитозоне резко ухудшается именно в августе, сентябре и октябре, когда наблюдается максимальное оттаивание многолетнемерзлых грунтов в основаниях дорог.

**Ранжирование систем автомобиля КамАЗ по чувствительности к низким климатическим температурам.** Поскольку в условиях криолитозоны определяющим фактором климата являются экстремально низкие температуры наружного воздуха, то распределение отказов по календарным месяцам позволяет оценить влияние климатической температуры на работоспособность систем автомобиля. Анализ гистограмм отказов показал, что из всех систем автомобиля КамАЗ, лимитирующих его работоспособность, двигатель, его системы охлаждения и питания, электрооборудование относятся к группам, на которые климатические условия оказывают

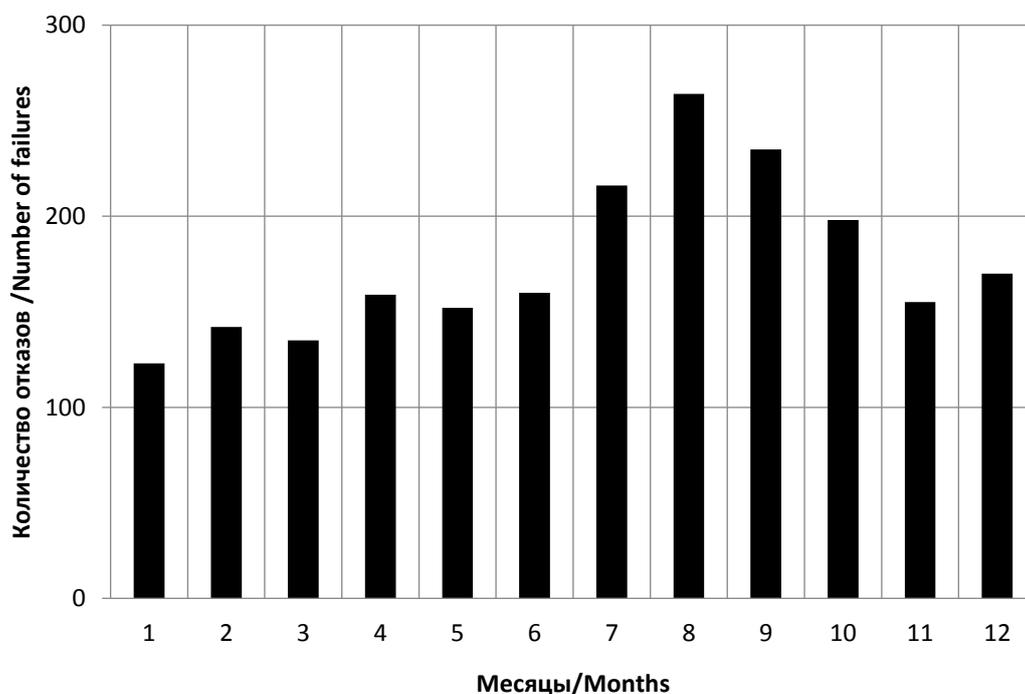


Рис. 6. Распределение количества отказов подвески автомобиля КамАЗ по месяцам  
Fig. 6. Monthly distribution of KamAZ suspension failures

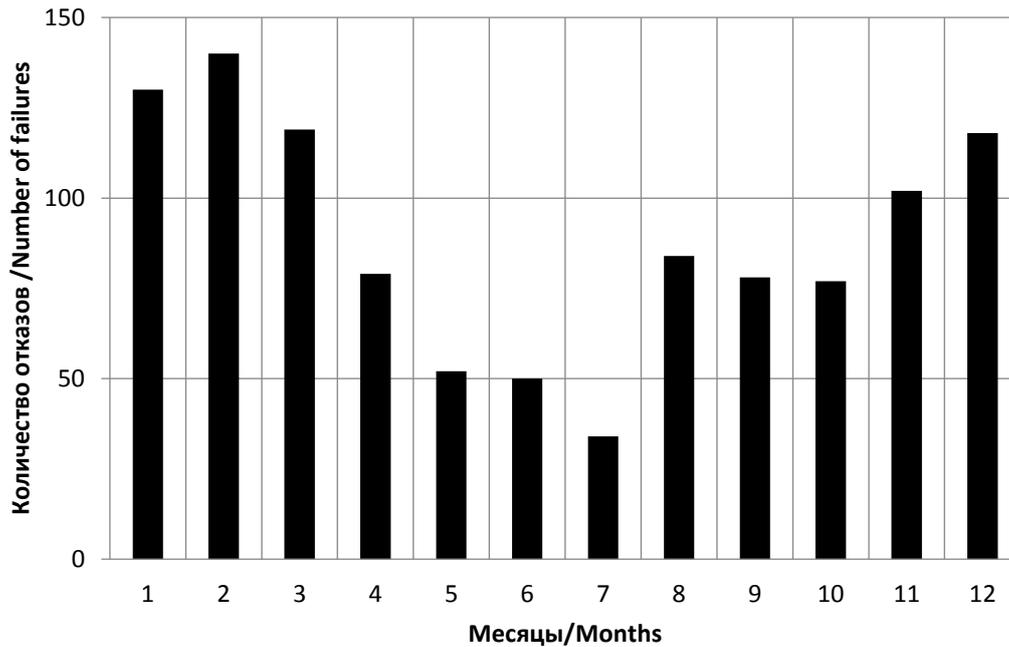


Рис. 7. Распределение количества отказов рулевого управления автомобиля КамАЗ по месяцам  
Fig. 7. Monthly distribution of KamAZ steering gear failures

### Результаты исследования и их обсуждение

значимое влияние. Распределение отказов тормозной системы также свидетельствует о ее чувствительности к низким температурам воздуха, но имеет некоторое отличие: чаще наблюдаются отказы в два особо холодных месяца года. Рулевое управление следует отнести к системам, чувствительным не только к низким температурам среды, но и к другим факторам. Так как для этой системы наблюдается значительная разница в количестве отказов в зимнее и летнее время, а их повышение в августе, сентябре и октябре может быть объяснено влиянием дорожных условий на работоспособность рулевого управления. Совершенно другое распределение отказов имеет подвеска – наибольшее количество отказов происходит в теплое время, поскольку факторами, определяющими работоспособность подвески, являются в большей степени дорожные условия.

В результате анализа работоспособности других систем автомобиля КамАЗ сделаны следующие выводы:

1. Сцепление, коробка передач, приборы, система вентиляции и отопления, устройство подъемное и опрокидывающее

платформы имеют выраженную зависимость от низкой климатической температуры, так как количество отказов этих групп в летнее время существенно ниже, чем зимой. Так, например, для сцепления наблюдается небольшое месячное количество отказов (4–6 % от годового количества отказов этой системы) в период с апреля по август и относительно высокое (8–12 %) в остальное время года, для коробки передач количество отказов снижается с 15 % в декабре до 3 % в мае.

2. Для отдельных систем, таких как карданные валы, задний и средний мосты, наблюдается максимум числа отказов не только в зимнее время, но и в другие периоды. Это указывает на то, что наряду с низкими климатическими температурами, значительное влияние на работоспособность этих систем оказывают и другие факторы эксплуатации.

3. Для системы выпуска газов, рамы, колес и шин, элементов кабины и некоторых других групп деталей и сборочных единиц количество отказов мало зависит от времени года, что указывает на отсутствие явной температурной зависимости.



## Заключение

На основе статистической информации постоянно пополняемого банка данных «Техника Севера» проведено исследование эксплуатационной работоспособности наиболее массовых отечественных грузовых автомобилей КамАЗ в природно-климатических условиях криолитозоны. Проведен анализ отказов, их распределений во времени, выявлены детали и системы, лимитирующие работоспособность этих автомобилей на Севере. Анализ распределений отказов групп деталей и сборочных единиц автомобиля КамАЗ по календарным месяцам позволил разделить эти системы на три типа по признаку их чувствительности к низким температурам наружного воздуха:

Первый тип – группы деталей и сборочных единиц, для которых низкие темпе-

ратуры окружающей среды являются доминирующим фактором влияния на их работоспособность (двигатель, системы питания и охлаждения двигателя, электрооборудование, тормозная система, сцепление, коробка передач, приборы, система вентиляции и отопления, устройство подъемное и опрокидывающее платформы).

Второй тип – группы, на работоспособность которых низкие температуры влияют наряду с другими эксплуатационными воздействиями (рулевое управление, карданные валы, задний и средний мосты).

Третий тип – группы, не проявляющие явную зависимость от низких температур наружного воздуха (подвеска, система выпуска газов, рама, колеса и шины, элементы кабины и некоторые др.).

## Библиографический список

1. D. Blower, P.E. Green, A. Matteson Condition of trucks and truck crash involvement: evidence from the large truck crash causation study // *Transportation Research Record*. 2010. No. 2194. P. 21–28. DOI: 10.3141/2194-03.
2. Григорьев Р.С., Ларионов В.П., Уржумцев Ю.С. Методы повышения работоспособности техники в северном исполнении. Новосибирск: Наука, 1987. 252 с.
3. Яковлева С.П., Буслаева И.И., Махарова С.Н., Левин А.И. Структурная поврежденность пружинно-рессорной стали после эксплуатации в зоне холодного климата // *Фундаментальные исследования*. 2017. № 10. Ч. 3. С. 530–535. DOI: 10.17513/fr.41870 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41870> (дата обращения: 5.04.2018).
4. Яковлева С.П., Буслаева И.И., Махарова С.Н., Левин А.И. Оценка поврежденности и ударной вязкости металла упругих элементов автотранспорта при работе в криолитозоне // *Материалы и технологии для Арктики: доклады Междунар. конф. (Санкт-Петербург, 13–14 декабря 2017 г.)*. Санкт-Петербург, 2017. С. 285–295.
5. Yakovleva S.P., Buslaeva I.I., Makharova S.N., Levin A.I. Operational Damage to the Structure and Failure of the KAMAZ Truck Spring in the Temperature–Load Conditions of the North // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2017. Vol. 46. No. 5. P. 488–493. © Allerton Press, Inc., 2017. ISSN: 1052-6188 DOI: 10.3103/S1052618817050144. (Scopus).
6. Егоров В.А., Слепенко Е.А., Мунхтур М. Особенности эксплуатации автомобилей при низких температурах // *Труды Братского государственного университета*. Серия: Естественные и инженерные науки. 2013. Т. 1. С. 128–133.
7. Куринный Н.А., Семькина А.С. Неисправности автомобилей, возникающие при воздействии низких температур в условиях Крайнего Севера // *Современные автомобильные материалы и технологии (САМИТ-2016): сб. статей VIII Междунар. науч.-техн. конф. (Курск, 24–25 ноября 2016 г.)*. Курск, 2016. С. 227–230.
8. Неговора А.В., Разяпов М.М., Курдин П.Г., Филиппов Ю.К., Токарев В.А. Современные проблемы эксплуатации автомобилей в условиях низких температур независимо от климатической зоны // *Журнал автомобильных инженеров*. 2017. № 4 (105). С. 36–41.
9. Каталог деталей и сборочных единиц автомобилей КамАЗ-5320, КамАЗ-53212, КамАЗ-5410, КамАЗ-54121 и КамАЗ-5511 / Камское объединение по производству большегрузных автомобилей. М.: Машиностроение, 1983. 415 с.
10. Охотников Б.Л., Бердышев И.В. Проблемы, связанные с эксплуатацией ДВС при низкой температуре окружающего воздуха, и пути их преодоления // *Автотранспортное предприятие*. 2011. № 4. С. 46–48.
11. Долгушин А.А., Курносов А.Ф., Вакуленко М.В., Домнышев Д.А. Исследование теплового режима работы агрегатов трансмиссии и подвески автомобиля в зимних условиях // *Достижения науки и техники АПК*. 2015. Т. 29. № 7. С. 82–84.



12. Неговора А.В., Разяпов М.М., Закиев М.Г., Шерстнев Н.А. Изучение влияния низких температур на коробку передач автомобиля КамАЗ ZF 16S 1820TO // Автомобиль для Сибири и Крайнего Севера: конструкция, эксплуатация, экономика: материалы 90 Междунар. науч.-техн. конф. Ассоциации автомобильных инженеров в ИРНИТУ (г. Иркутск, 09–10 апреля 2015 г.). Иркутск, 2015. С. 273–278.

13. Q. Li, X.C. Wang, X. He, Z.H. Cai, Y.L. Di. Influence of Loads on Tribological Property of Heavy Vehicle Engine Piston Ring-Cylinder Liner // *Cailliao Gongcheng*,

2014, No. 6, pp. 56–61. DOI: 10.11868/j.issn.1001-4381.2014.06.011.

14. Мамаев Д.С., Николаенко Н.Н. Проблемы повышения надежности систем (питания, смазки) дизельного двигателя автомобилей КамАЗ при эксплуатации в условиях низких температур // Научный вестник Вольского военного института материального обеспечения: военно-научный журнал. 2018. № 1 (45). С. 184–186.

## References

1. D. Blower, P.E. Green, A. Matteson Condition of trucks and truck crash involvement: evidence from the large truck crash causation study // *Transportation Research Record*, 2010, No. 2194, pp. 21–28. DOI: 10.3141/2194-03.

2. Grigor'ev R.S., Larionov V.P., Urzhumcev YU.S. *Metody povysheniya rabotosposobnosti tekhniki v severnom ispolnenii* [Methods to improve the performance of northern version machinery]. Novosibirsk: Nauka, 1987. 252 p. (In Russian)

3. Yakovleva S.P., Buslaeva I.I., Makharova S.N., Levin A.I. *Strukturnaya povrezhdennosti pruzinno-ressornoj stali posle ekspluatsii v zone xolodnogo klimata* [The structural damage of spring steel after operation in the cold climate zone]. *Fundamentalnie isledovaniya*. 2017, no. 10. (Part 3), pp. 530–535. DOI: 10.17513/fr.41870 [Fundamental Research]. Available at: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41870> (accessed 10 November 2017).

4. Yakovleva S.P., Buslaeva I.I., Maharova S.N., Levin A.I. *Ocenka povrezhdennosti i udarnoy vyazkosti metalla uprugih ehlementov avtotransporta pri rabote v kriolitnozone* [Assessment of damage and impact toughness of motor transport elastic element metal under operation in the cryolithozone]. *Doklady Mezhdunarodnoj konferencii "Materialy i tekhnologii dlya Arktiki"* [Reports of the International Conference "Arctic Materials and Technologies", Saint-Petersburg, 13–14 December 2017]. Saint-Petersburg, 2017, pp. 285–295. (In Russian)

5. Yakovleva S.P., Buslaeva I. I., Makharova S.N., Levin A.I. Operational Damage to the Structure and Failure of the KAMAZ Truck Spring in the Temperature–Load Conditions of the North. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2017, vol. 46, no. 5, pp. 488–493. DOI: 10.3103/S1052618817050144

6. Egorov V.A., Slepenco E.A., Munhtur M. Features of motor car operation at low temperatures. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennyye i inzhenernyye nauki* [Proceedings of Bratsk State University. Series: Natural and Engineering Sciences], 2013, T. 1, pp. 128–133. (In Russian)

7. Kurinniy N.A., Semikina A.S. *Neispravnosti avtomobiley, voznikayushchie pri vozdeystvii nizkikh temperatur v usloviyah Kraynego Severa* [Vehicle faults occurring when exposed to low temperatures in the far North].

*Sbornik statey VIII Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii. Otvetstvennyy redaktor E.V. Ageev "Sovremennyye avtomobilnyye materialy i tekhnologii" (SAMIT-2016)* [Collection of articles of VIII International scientific and technical conference: Modern automobile materials and technologies (SAMIT-2016). Kursk 24–25 November 2016]. Kursk, 2016, pp. 227–230. (In Russian)

8. Negovora A.V., Razyapov M.M., Kurdin P.G., Filippov Yu.K., Tokarev V.A. Modern problems of motor car operation in low temperatures regardless of the climate zone. *Zhurnal avtomobilnykh inzhenerov* [Zurnal AAI], 2017, no. 4 (105), pp. 36–41. (In Russian)

9. *Katalog detalej i sborochnykh edinic avtomobilej KamAZ-5320, KamAZ-53212, KamAZ-5410, KamAZ-54121 i KamAZ-5511* [Catalog of parts and assembly units of KAMAZ-5320, KAMAZ-53212, KAMAZ-5410, KAMAZ-54121 and KAMAZ-5511 vehicles] / *Kamskoe ob"edinenie po proizvodstvu bol'shegruznykh avtomobilej*. [Kama Association on heavy vehicle production]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1983. 415 p. (In Russian)

10. Ohotnikov B.L., Berdyishev I.V. Problems associated with internal combustion engine operation at low ambient temperatures and ways to overcome them. *Avtotransportnoe predpriyatie* [ATP "Motor Transport Company"], 2011. no. 4, pp. 46–48. (In Russian)

11. Dolgushin A.A., Kurnosov A.F., Vakulenko M.V., Domnyishev D.A. Study of thermal regime of transmission units and car suspension under winter conditions. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* [Achievements of Science and Technology of AIC], 2015, vol. 29, no. 7, pp. 82–84. (In Russian)

12. Negovora A.V., Razyapov M.M., Zakiev M.G., Sherstnev N.A. *Izuchenie vliyaniya nizkikh temperatur na korobku peredach avtomobilya KAMAZ ZF 16S 1820TO* [Studying the effect of low temperatures on KAMAZ ZF 16S1820TO transmission]. *Materialy 90 Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii Assotsiatsii avtomobil'nykh inzhenerov v IRNITU "Avtomobil" dlya Sibiri i Krajnego Severa: konstrukciya, ekspluatsiya, ekonomika* [Proceedings of 90 International scientific and practical conference of the Association of Automotive Engineers in INRTU: Automobile for Siberia and the Far North: design, operation, economy, Irkutsk, 09–10 April 2015]. Irkutsk, 2015, pp. 273–278. (In Russian)



13. Li Q., Wang X.C., He X., Cai Z.H., Di Y.L. Influence of Loads on Tribological Property of Heavy Vehicle Engine Piston Ring-Cylinder Liner. *Cailiao Gongcheng*, 2014, no. 6, pp. 56–61. DOI: 10.11868/j.issn.1001-4381.2014.06.011.

14. Mamaev D.S., Nikolaenko N.N. To enhance the reliability of the systems (power, lubricants) diesel engine

kamaz when operating in low temperature conditions. *Nauchnyy vestnik Volskogo voennogo instituta materialnogo obespecheniya: voenno-nauchnyy zhurnal* [Scientific Bulletin of the Volsk military Institute of material support: military scientific magazine], 2018, no. 1 (45), pp. 184–186. (In Russian)

#### **Критерии авторства**

Зудов Г.Ю., Буслаева И.И., Лебедев М.П., Левин А.И. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

#### **Authorship criteria**

Zudov G.Yu., Buslaeva I.I., Lebedev M.P., Levin A.I. have equal authors' rights and bear equal responsibility for plagiarism.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### **Conflict of interests**

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.



Оригинальная статья / Original article

УДК 665.75+665.353.3

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-10-178-188>

## СЖИМАЕМОСТЬ ПАЛЬМОВОГО МАСЛА И ЕГО СМЕСЕЙ С ДИЗЕЛЬНЫМ ТОПЛИВОМ

© Э.Ч. Кадията<sup>1</sup>, В.М. Славущий<sup>2</sup>, А.В. Курапин<sup>3</sup>, Е.А. Салыкин<sup>4</sup>

Волгоградский государственный технический университет,  
400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр-т им. В.И. Ленина, 28.

**РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ.** В данной работе проведены экспериментальные исследования по определению коэффициентов сжимаемости дизельного топлива и его смесей с пальмовым маслом, а также чистого пальмового масла с целью определения влияния давлений сжатия и составов смесевых топлив на скорости звука и коэффициенты сжимаемости указанных топлив. **МЕТОДЫ.** После проведения обзора и анализа существующих методов (в данной работе) выбран метод измерения скорости звука в топливе, находящемся в нагнетательном трубопроводе. Скорость звука определяется по моментам начала нарастания давлений во входном и выходном сечениях трубопровода. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** При увеличении давлений сжатия и плотности топлива, зависящем от объемного содержания пальмового масла в смеси с дизельным топливом, скорость звука в топливе растет, а истинный коэффициент сжимаемости уменьшается. При этом – чем меньше плотность, тем больше предельные изменения истинного коэффициента сжимаемости. Таким образом, подтверждаются данные проводившихся ранее исследований о том, что с ростом плотности углеводородных топлив зависимость их сжимаемости приближается к закону Гука. **ВЫВОДЫ.** Результаты исследования могут быть использованы при моделировании процесса топливоподачи дизельных двигателей, работающих на смесях дизельного топлива и пальмового масла.

**Ключевые слова:** дизельное топливо, пальмовое масло, смесевое биотопливо, коэффициент сжимаемости, скорость звука в топливе, плотность, давление.

**Информация о статье.** Дата поступления 12 июля 2018 г.; дата принятия к печати 28 сентября 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 октября 2018 г.

**Формат цитирования.** Кадията Э.Ч., Славущий В.М., Курапин А.В., Салыкин Е.А. Сжимаемость пальмового масла и его смесей с дизельным топливом // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 10. С. 178–188. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-178-188

## COMPRESSIBILITY OF PALM OIL AND ITS MIXTURES WITH DIESEL FUEL

E. Ch. Kadiata, V.M. Slavutsky, A.V. Kurapin, E.A. Salykin

Volgograd State Technical University,  
28, Lenin pr., Volgograd, 400005, Russian Federation

**ABSTRACT. PURPOSE.** The paper presents experimental studies on the determination of the compressibility coefficients of diesel fuel and its mixtures with palm oil, as well as pure palm oil in order to estimate the effect of compression pressures and mixed fuel compositions on sound velocity and compressibility coefficients of the fuels under

<sup>1</sup>Кадията Эмери Чибанда, аспирант, e-mail: [kadiataemery@gmail.com](mailto:kadiataemery@gmail.com)

Emery Ch. Kadiata, Postgraduate student, e-mail: [kadiataemery@gmail.com](mailto:kadiataemery@gmail.com)

<sup>2</sup>Славущий Виктор Михайлович, доктор технических наук, профессор кафедры транспортных машин и двигателей, e-mail: [viktorslav39@gmail.com](mailto:viktorslav39@gmail.com)

Viktor M. Slavutsky, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Transport Machines and Engines, e-mail: [viktorslav39@gmail.com](mailto:viktorslav39@gmail.com)

<sup>3</sup>Курапин Алексей Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры транспортных машин и двигателей, e-mail: [vann.69@mail.ru](mailto:vann.69@mail.ru)

Aleksei V. Kurapin, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Transport Machines and Engines, e-mail: [vann.69@mail.ru](mailto:vann.69@mail.ru)

<sup>4</sup>Салыкин Евгений Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры транспортных машин и двигателей, e-mail: [esalykin@gmail.com](mailto:esalykin@gmail.com)

Evgeny A. Salykin, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Transport Machines and Engines, e-mail: [esalykin@gmail.com](mailto:esalykin@gmail.com)



analysis. **METHODS.** Having reviewed and analyzed the existing methods, the authors chose the method for measuring sound velocity in the fuel located in the discharge pipe. The sound velocity is determined by the moments of initial pressure rise in the inlet and outlet sections of the pipeline. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** When the compression pressure and fuel density, which depends on the volume content of palm oil in the mixture with diesel fuel, grow the sound velocity in the fuel increases, while the true compressibility coefficient decreases. In this case the lower the density, the greater the limit variations of the true compressibility coefficient. Therefore, the proof is given to the data of previous studies where it was found out that the dependence of hydrocarbon fuel compressibility approaches the Hooke's law as fuel density grows. **CONCLUSIONS.** The results of the study can be used for the simulation of fuel supply in diesel engines operating on the mixtures of diesel fuel and palm oil.

**Key words:** diesel fuel, palm oil, mixed biofuel, compressibility coefficient, sound velocity in fuel, density, pressure

**Information about the article.** Received July 12, 2018; accepted for publication September 28, 2018; available online October 31, 2018.

**For citation.** Kadiata E.Ch., Slavutsky V.M., Kurapin A.V., Salykin E.A. Compressibility of palm oil and its mixtures with diesel fuel. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnic-eskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 10, pp. 178–188. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-178-188. (In Russian)

## Введение

В настоящее время и на период до 2040–2050 гг. двигатели внутреннего сгорания транспортного назначения останутся главным потребителем моторных топлив. В структуре парка этих двигателей сегодня в мире доля дизелей приближается к 20%. И, если в США, где разразился экологический скандал по поводу дизельных автомобилей концерна Volkswagen, их доля меньше 3%, то в странах ЕС дизельным топливом уже заправляется 53% автомобилей. Наибольшую долю, кроме Volkswagen, дизельные автомобили занимают в продажах таких компаний, как Volvo (80%), BMW (81%), Daimler (71%), Renault и Peugeot (более 50%) [1].

В современных условиях к показателям работы дизелей предъявляется целый комплекс достаточно жестких требований. Приоритетными считаются топливная экономичность и токсичность отработавших газов.

Одним из наиболее перспективных направлений совершенствования дизелей с целью снижения потребления нефтяных топлив и уменьшения вредных выбросов

является их адаптация к работе на альтернативных топливах, как возобновляемых энергоресурсах.

Одним из видов альтернативных топлив являются биотоплива растительного происхождения, среди которых огромную роль в качестве топлива для транспортных дизелей играет пальмовое масло (ПМ) и его смеси с дизельным топливом (ДТ), особенно в странах с тропическим климатом. В настоящее время пальмовое дерево (*Elaeisguineensis*) занимает прочные позиции в мировом сельском хозяйстве, как одна из масличных культур, производящихся в странах с тропическим климатом. Производство пальмового масла в мире в период 2016–2017 гг. оценивается в 65,4 млн т [2].

В связи с вышесказанным, высокую актуальность приобретают теоретические и экспериментальные исследования работы дизелей на смешанном топливе на основе ДТ и ПМ. Для моделирования и исследования процесса топливоподачи в таких дизелях необходимы данные о коэффициентах сжимаемости смесей ДТ и ПМ, а также чистого ПМ.

## Анализ исследований сжимаемости смешанных топлив на основе пальмового масла и методов ее определения

Проблемами использования растительных масел в качестве топлива для дизелей в России занимались вузы: Москов-

ский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Российский университет дружбы народов, Московский гос-



ударственный университет имени М.В. Ломоносова, Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина. Активно работают в этом направлении В.А. Марков, С.Н. Девянин, А.И. Гайворонский<sup>5</sup> [3] и др. Применение пальмового масла активнее изучали зарубежные ученые: М.М. Рашид [4], А. Санжид [5], М.Н. Мосароф [6], П. Гумпон и А. Тее-рауат [7], Ц. Бартелеми [8], Калам [9], Ндаишмие и Тазероут [10], Сонг [11]. Исследования проводятся в таких организациях, как Centre for energy science (Малазия), University of King Abdelaziz (Саудовская Аравия), University of Queensland (Австралия), University of Songkla (Тайланд) и др. Также исследования проводятся в различных лабораториях Франции, Германии, Швеции, Канады и других стран. В статье [12] приводится, выполненный авторами, обзор проведенных ранее исследований на эту тему.

Наиболее известным ученым, занимавшимся проблемами определения сжимаемости топлив для дизельных двигателей в нашей стране, является И.В. Астахов [13]. Большой объем информации о сжимаемости моторных топлив и ее влиянии на процессы топливоподачи приведен в трудах Л.В. Грехова<sup>6</sup>.

По результатам анализа последних исследований и публикаций можно сказать следующее. Нефтяное дизельное топливо и пальмовое масло хорошо смешиваются. На практике возможно использование пальмового масла в дизеле как добавки к дизельному топливу в виде так называемого смесового топлива. Но из-за существующих отличий химических составов и физических свойств смесей различного состава они оказывают различное влияние на процесс горения, в том числе на период запаздывания воспламенения, скорость

выделения тепла и другие параметры. Физические параметры пальмового масла и его смеси также оказывают влияние на процессы топливоподачи и смесеобразования. Пальмовое масло более вязкое и имеет значительную плотность, которая способствует некоторому увеличению дальности топливного факела и диаметра капель распылительного топлива, что может привести к увеличению количества топлива, попадающего на стенки камеры сгорания и гильзы цилиндра. Эти характеристики искажают процессы смесеобразования и сгорания топлива.

Биотопливо на основе пальмового масла является сжимаемым. Для оценки его сжимаемости воспользуемся теми же эмпирическими зависимостями, которые применяются для оценки сжимаемости дизельного топлива.

Коэффициент сжимаемости является важным физическим параметром смесового биотоплива как моторного топлива. Отличие его плотности от плотности дизельного топлива заметно влияет на сжимаемость. Меньшие значения коэффициента сжимаемости пальмового масла приводят к увеличению действительного угла опережения впрыскивания топлива и максимального давления в форсунке. Сжимаемость пальмового масла как топлива растительного происхождения и как добавки к дизельному топливу может также влиять на динамику развития топливных факелов и их основные геометрические параметры в зависимости от концентрации компонентов топливных смесей при их впрыскивании в камеру сгорания [14].

В литературных источниках экспериментальные данные о влиянии сжимаемости пальмового масла и его смесей на процесс топливоподачи и показатели дизеля встречаются очень редко. В обзорной

<sup>5</sup>Марков В.А., Гайворонский А.И., Грехов Л.В., Иващенко Н.А. Работа дизелей на нетрадиционных топливах: учеб. пособие. М.: Изд-во «Легион-Автодата», 2008. 464 с. / Markov V.A., Gaivoronsky A.I., Grekhov L.V., Ivashchenko N.A. Diesel engine operation using unconventional fuels: Learning aids. M.: Legion-Avtodata Publishing House, 2008. 464 p.

<sup>6</sup>Грехов Л.В., Габитов И.И., Неговора А.В. Конструкция, расчет и технический сервис топливopодающих систем дизелей: учеб. пособие. М.: Изд-во Легион-автодата, 2013. 292 с. / Grekhov L.V., Gabitov I.I., Negovora A.V. Design, calculation and maintenance of fuel injection systems of diesel engines: Learning aids. M.: Legion Avtodata Publishing House, 2013. 292 p.



работе [15] представлены результаты обзора более сотни статей о показателях работы дизеля с использованием биотоплива на основе пальмового масла, которые были опубликованы за последние десятилетия. В частности сообщается, что более низкая сжимаемость пальмового масла наравне с составом жирных кислот и цетановым числом являются основными факторами, влияющими на раннее начальное горение и короткое время задержки воспламенения.

Оценить влияние использования пальмового масла и его смесей с дизельным топливом как моторного топлива на процессы топливоподачи – величину цикловой подачи, давление впрыскивания, продолжительность впрыскивания и другие без оценки сжимаемости ПМ и его смесей с ДТ сложно. Однако вопрос о влиянии состава смеси биотоплива, содержащего ДТ и пальмовое масло, на параметры его сжимаемости и процессы впрыскивания топлива остается недостаточно изученным [16].

Мерой сжимаемости жидкости служит коэффициент сжимаемости  $\alpha$ . Коэффициент сжимаемости может быть истинным  $\alpha_{ист}$  или средним  $\alpha_{ср}$ . Истинный коэффициент сжимаемости  $\alpha_{ист}$  определяется относительным изменением объема  $\Delta V/V$  при изменении давления  $\Delta P$  и вычисляется в виде

$$\alpha_{ист} = \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta P}, \quad (1)$$

где  $V$  – начальный объем топлива;  $\Delta V$  – уменьшение объема топлива при повышении давления;  $\Delta P$  – относительное приращение давления.

Коэффициент  $\alpha_{ист}$  характеризует изменение объема при данном давлении.

Средний коэффициент сжимаемости  $\alpha_{ср}$  определяют при изменении давления от атмосферного до выбранного верхнего предела:

$$\alpha_{ср} = \frac{\Delta V}{VP}, \quad (2)$$

где  $\Delta V$  – уменьшение объема топлива при повышении давления от атмосферного до  $P$ .

Коэффициент  $\alpha_{ср}$  характеризует среднюю сжимаемость топлива в рассматриваемом диапазоне изменения давлений. Как следует из уравнения (2),  $\alpha_{ср}$  определяется из допущения, что сжимаемость топлива подчиняется закону Гука.

Коэффициент сжимаемости  $\alpha_{ист}$  увеличивается с ростом температуры, уменьшением давления и плотности нефтепродуктов. Для ДТ его значения изменяются от  $(90 \dots 100) \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$  при атмосферном давлении до  $(30 \dots 40) \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$  при давлениях 100 МПа и выше<sup>6</sup>. Несправедливость закона Гука – уменьшение  $\alpha_{ист}$  с ростом давления – объясняется наличием в топливе нерастворенного воздуха. Лишь при высоких давлениях его влияние исчерпывается.

Для определения коэффициента сжимаемости возможно использование большого количества различных методик. Большинство из них сводится к двум основным методам<sup>6</sup>:

1) сжатие топлива от атмосферного до заданного давления в некотором сосуде (бомбе) и определение уменьшения объема топлива для получения  $\alpha_{ср}$ ;

2) расчет  $\alpha_{ист}$  через скорость звука в трубопроводе.

Оба метода имеют свои методические погрешности. Однако для топливных систем дизелей непосредственного действия с нагнетательным трубопроводом, по нашему мнению, больше подходит второй метод, так как в этих системах давление в трубопроводе распространяется в виде волны со скоростью звука.

Согласно Л.В. Грехову<sup>6</sup>, описание волнового процесса неразрывно связано с понятием и оценкой скорости звука. Исходя из известного в теоретической физике определения скорости звука в бесконечной среде, можно записать:

$$\alpha_{\infty} = \sqrt{\frac{dP}{d\rho}} = \sqrt{\frac{1}{\rho \alpha_{ист}}}, \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность среды.



При нормальных условиях в бензине  $\alpha_{\infty} = 950 \dots 1200$  м/с, ДТ – 1250...1400 м/с, мазуте – 1350...1450 м/с.

В [13] И.В. Астахов предложил следующую формулу для определения  $\alpha_{ист}$  по скорости распространения волны давления топлива в нагнетательном трубопроводе высокого давления с учетом его деформации:

$$\alpha_{ист} = -\frac{1+P_n k}{2P_n} + \sqrt{\left(\frac{1+P_n k}{2P_n}\right)^2 + \frac{1}{a^2 \rho_0 P_n} - \frac{k}{P_n}}, \quad (4)$$

где  $P_n$  – давление топлива в начале сжатия, Па;  $a$  – скорость звука в топливе, м/с;  $\rho_0$  – плотность топлива при атмосферных условиях, кг/м<sup>3</sup>;  $k$  – поправка Ротрока,  $k = \frac{2}{E} \left( \frac{R^2 + r^2}{R^2 - r^2} + \mu \right)$ ;  $E$  – модуль упругости материала трубопровода, МПа;  $R$  – наружный диаметр трубопровода, м;  $r$  – внутренний диаметр трубопровода, м;  $\mu$  – коэффициент Пуассона.

### Цели исследования

Настоящие экспериментальные исследования проводились с целью:

- определить скорости звука при распространении волны давления в нагнетательном трубопроводе для ДТ, ПМ и их смесей;
- установить зависимость коэффициента сжимаемости ДТ, ПМ и их смесей от величины давления сжатия;
- установить зависимость коэффи-

циента сжимаемости смесевое топлива от объемного содержания в нем ДТ и ПМ.

При этом решались следующие задачи:

- создание экспериментальной установки для определения скорости волны давления в трубопроводе высокого давления;
- разработка методики проведения эксперимента и обработки результатов.

### Материал и методы исследования

При выполнении работы, в соответствии с поставленными задачами исследований, использована экспериментальная установка, разработанная на основе стенда для регулировки форсунок КИ-3333. Гидравлическая схема установки приведена на рис. 1.

В установке использован штатный ручной одноплунжерный насос высокого давления стенда КИ-3333 с отсечной кромкой и нагнетательным клапаном. Длина соединительных трубопроводов 5 максимально минимизирована с целью уменьшения объема системы. Параметры нагнетательного трубопровода 6 представлены в табл. 1.

В качестве концевой емкости использована форсунка ФД-22, которая регулировалась на различные давления начала впрыскивания.

На входе и выходе нагнетательного трубопровода 6 установлены датчики давления 7 и 8 типа БД модели ПД-Р произ-

водства компании ВД (Индия) со следующими техническими характеристиками:

- диапазон измерения: 0...60 МПа;
- погрешность: 0,5% от предела измерений;
- выходной сигнал: 4...20 мА;
- питание: DC 10...30 В;
- температура измеряемой среды: от – 40°С до + 150°С.

Сигнал с датчиков регистрировался и записывался с помощью аналогово-цифрового преобразователя Z230 производства компании Zetlab, работающего в двухканальном режиме, с использованием программного обеспечения Powergraph.

Методика проведения экспериментов была следующей. Пружина иглы форсунки затягивалась на определенное давление начала впрыскивания, затем с помощью ручного насоса высокого давления топливо нагнеталось в трубопровод. После подъема давления до значений, близких к

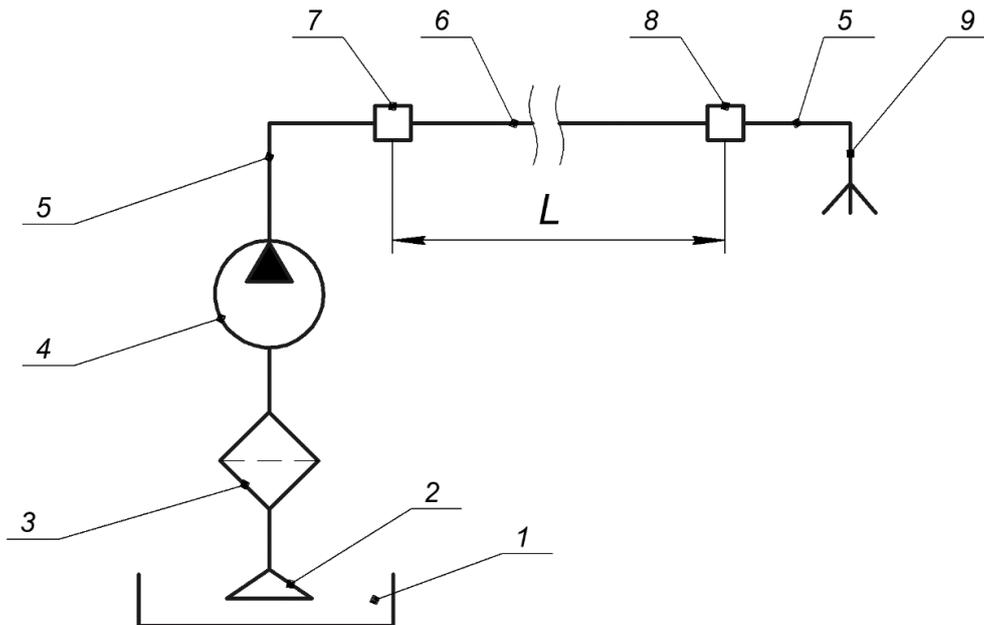


Рис. 1. Гидравлическая схема экспериментальной установки: 1 – емкость с топливом; 2 – топливозаборник; 3 – фильтр; 4 – нагнетательная секция топливного насоса высокого давления; 5 – соединительные трубопроводы; 6 – нагнетательный трубопровод; 7 – входной датчик давления; 8 – выходной датчик давления; 9 – форсунка  
Fig. 1. Hydraulic circuit diagram of the experimental installation 1 – fuel tank; 2 – fuel suction pipe; 3 – filter; 4 – injection section of the high-pressure fuel pump; 5 – connecting pipes; 6 – injection pipe; 7 – input pressure sensor; 8 – output pressure sensor; 9 – nozzle

Таблица 1

Технические характеристики нагнетательного трубопровода

Table 1

Discharge pipe performance specifications

Характеристика	Значение
Материал	углеродистая сталь
Модуль упругости $E$	$2,08 \cdot 10^{11}$ Па
Коэффициент Пуассона $\mu$	0,28
Длина	1,4 м
Внешний радиус $R$	0,003 м
Внутренний радиус $r$	0,001 м
Поправка Ротрока	$1,47 \cdot 10^{-11}$

давлениям открытия иглы форсунки, производились резкие нажатия на рычаг насоса для осуществления впрыскивания топлива через форсунку. Волны давлений в трубопроводе, возникавшие в этот момент, фиксировались датчиками и осциллографом и записывались в памяти компьютера. После этого давление открытия форсунки увеличивалось и опыты повторялись. Для точности результатов при каждом давлении открытия форсунки опыты повторялись по 3 раза, при этом производилось не менее

25 впрыскиваний топлива.

Осциллограмма сигналов входного и выходного датчиков давления показана на рис. 2. Изменение характеристик давления топлива на входе и выходе трубопровода позволяют установить скорость прохождения волны давления по нему. Для анализа использовались участки с резким нарастанием давления. При этом заметно, что импульс давления на выходном датчике запаздывает относительно импульса давления входного. Это запаздывание  $\Delta t$  харак-



теризует временной интервал, необходимый для прохождения волны давления по трубопроводу. Скорость волны давления  $a$  определялась по моментам появления импульсов давлений во входном и выходном сечениях трубопровода по формуле:

$$a = \frac{L}{\Delta t}, \quad (5)$$

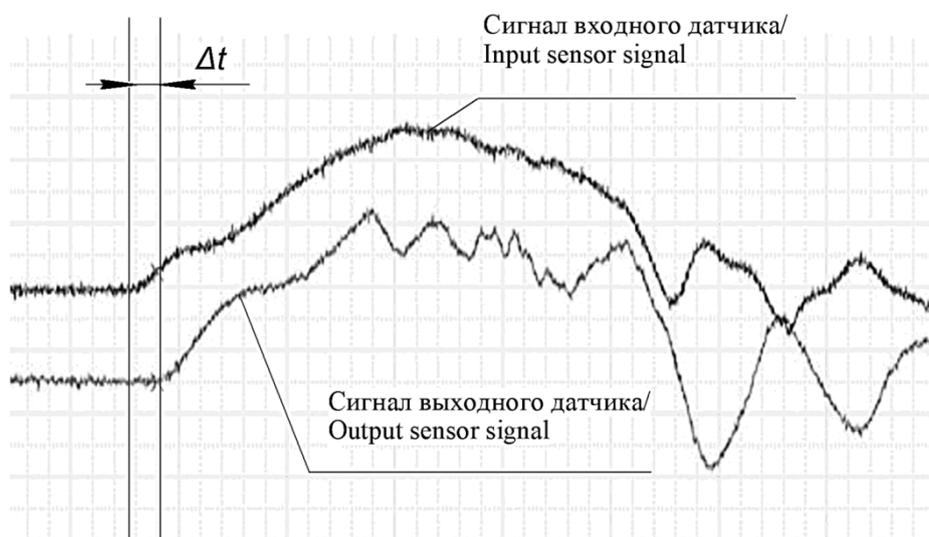
где  $L$  – действительное расстояние между датчиками, м.

После определения скорости распространения волны (местной скорости

звука)  $a$  определялись коэффициенты сжимаемости  $\alpha_{\text{ист}}$  смесей по формуле (4).

Опыты были проведены для восьми сортов топлива, в том числе стандартного дизельного топлива, чистого пальмового масла, а также для шести объемных составов смесей ПМ и ДТ. Смесей различного состава в зависимости от объемной доли содержания в них ПМ обозначим как ПМ10, ПМ20, ПМ30, ПМ40, ПМ50 и ПМ60. Физико-химические свойства указанных топлив и смесей показаны в табл. 2.

Смеси приготавливались механическим способом при нагревании до 60°C.



**Рис. 2. Осциллограмма импульсов давления во входном и выходном сечениях нагнетательного трубопровода**  
**Fig. 2. Oscillogram of pressure pulses in the inlet and outlet sections of the discharge pipe**

**Таблица 2**  
**Физико-химические свойства топлив, использовавшихся в экспериментах**  
**Table 2**

**Physical and chemical properties of fuels used in experiments**

Показатель	ДТ	ПМ	Смеси ДТ с ПМ, % содержания ПМ по объему					
			10	20	30	40	50	60
Плотность при 25°C, кг/м <sup>3</sup>	827	915	834	834,8	849,4	858,3	867,7	873,2
Вязкость при 20°C, сСт	3,5	37	4	4,7	5,7	8,3	11,1	12,8
Коэффициент поверхностного натяжения при 25°C, мН/м	25	27,8	24,5	24,8	25,2	25,3	25,7	26,5



Условия проведения опытов следующие: температура топлива  $t_f = 50^\circ\text{C}$ , давления начала впрыскивания форсунки  $P_\phi = 100, 200, 300, 400$  Бар. Давление топлива в начале сжатия  $P_n$  определялось по осциллограммам сигналов входного и вы-

ходного датчика в моменты резкого нарастания давления перед впрыскиванием (см. рис. 2). Разный уровень сигналов входного и выходного датчиков объясняется их разными масштабами.

### Результаты и их обсуждение

Результаты опытов по определению скорости звука (распространения волны давления) в исследуемых топливах представлены на рис. 3. Для построения по точкам опытных данных линий тренда использовалась логарифмическая аппроксимация, имеющаяся в функциях приложения Microsoft Excel. Как видно из данного рисунка, скорость распространения звука во всех испытанных топливах тем больше, чем больше  $P_n$  и плотность топлива. При этом с ростом давления рост скоростей звука несколько уменьшается.

Так, при 50 бар разность скоростей звука в ПМ и ДТ составляет около 200 м/с, а при 250 бар эта разность приближается к 150 м/с.

По полученным значениям скорости звука  $a$ , пользуясь формулой (4), были получены значения истинных коэффициентов сжимаемости  $\alpha_{\text{ист}}$  для исследуемых топлив, которые представлены на рис. 4.

Анализируя рис. 4, можно сделать вывод, что при увеличении  $P_n$  и плотности топлива, зависящей от объемного содержания пальмового масла в смеси с дизельным топливом, коэффициент  $\alpha_{\text{ист}}$  уменьшается. При этом, чем меньше плотность, тем больше предельные изменения  $\alpha_{\text{ист}}$ . Так, для ДТ  $\alpha_{\text{ист}}$  снижается от  $96 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$  при  $P_n = 50$  бар до  $80 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$  при  $P_n = 250$  бар, или на 16,6%, а для ПМ  $\alpha_{\text{ист}}$  снижается от  $62 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$  при  $P_n = 50$  бар до  $56 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$  при  $P_n = 250$  бар, или на 9,7%.

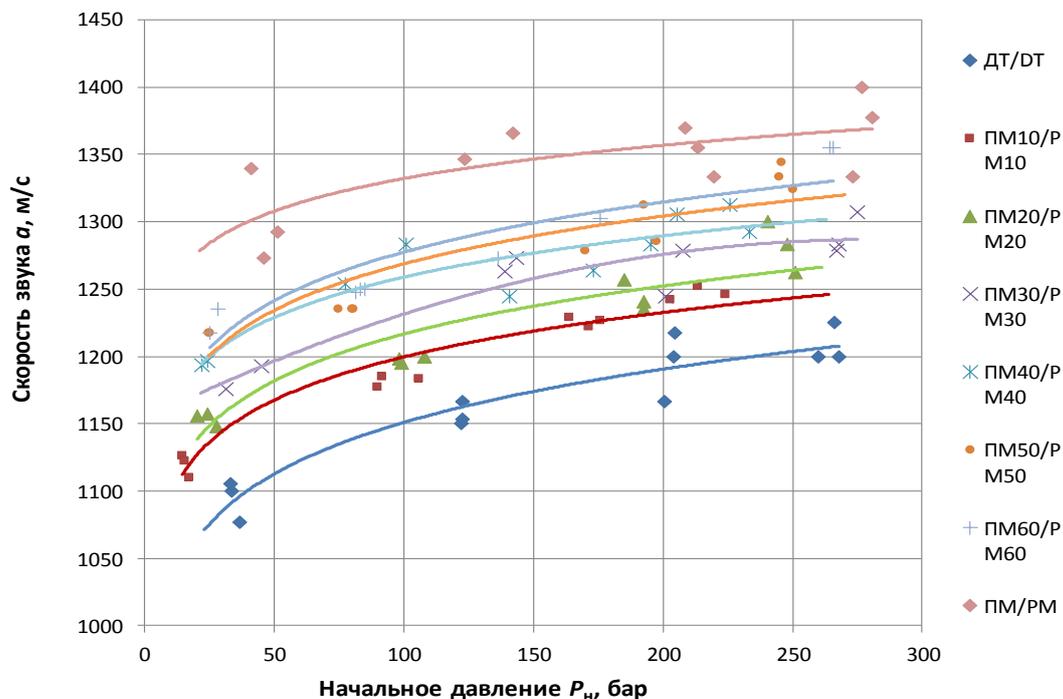


Рис. 3. Зависимости скорости распространения звука от начального давления  
Fig. 3. Sound velocity dependence on initial pressure

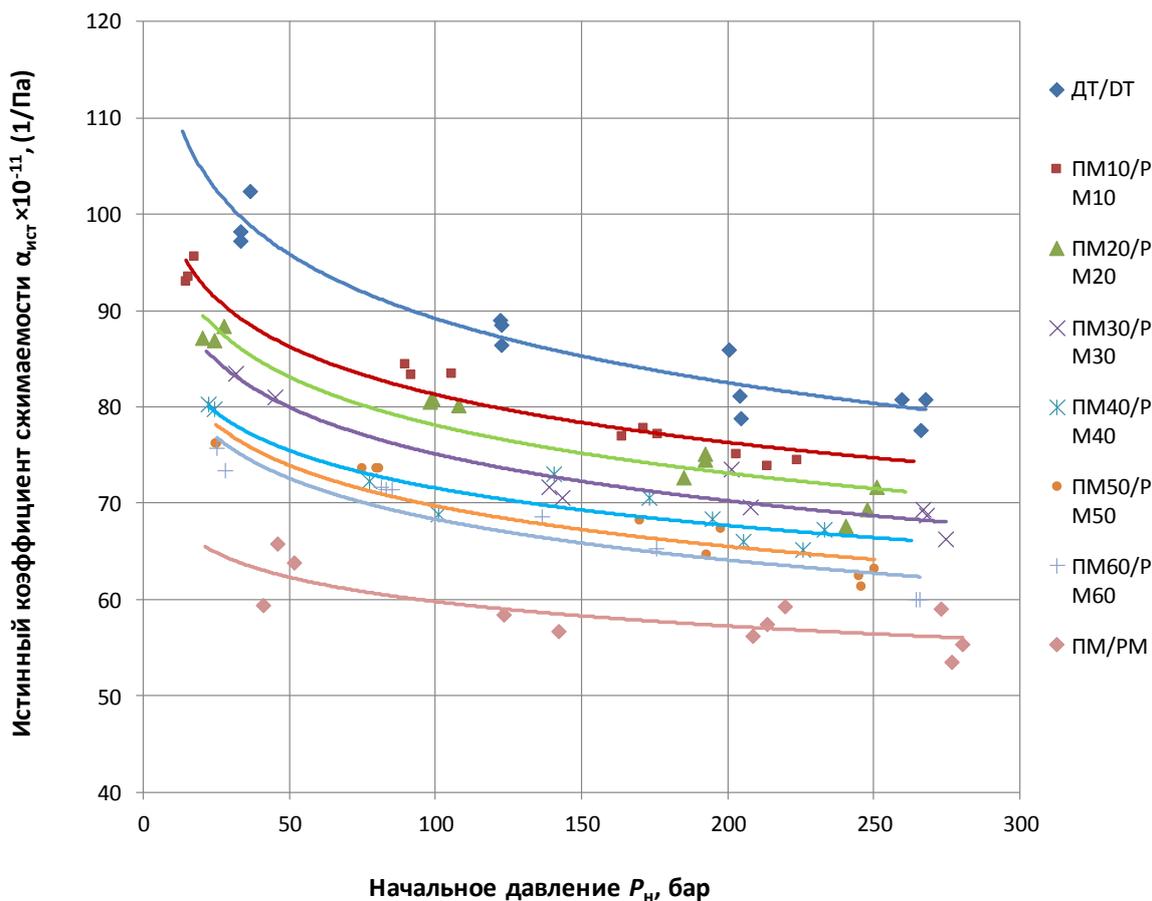


Рис. 4. Зависимости коэффициента сжимаемости от начального давления  
Fig. 4. Compressibility factor dependences on initial pressure

Таким образом, подтверждаются данные проводившихся ранее исследований<sup>6</sup> [13] о том, что с ростом плотности углеводородных топлив зависимость их сжимаемости приближается к закону Гука. Разница между коэффициентами сжимаемости ДТ и ПМ при  $P_n = 50$  бар составляет 35,4%, при  $P_n = 250$  бар – 30%. Что касается сме-

сей, то разница между коэффициентами сжимаемости ДТ и ПМ10 составляет от 10% при  $P_n = 50$  бар до 6,2% при  $P_n = 250$  бар, а разница между коэффициентами сжимаемости последующих смесей с повышением содержания ПМ меняется в среднем от 5% до 2% при соответствующих давлениях.

### Выводы

В результате проведенных экспериментов на созданной авторами экспериментальной установке по разработанной методике получены значения скоростей звука в нагнетательном трубопроводе при прохождении в нем (трубопроводе) импульсов давления для дизельного топлива, пальмового масла и их смесей. По полученным значениям скоростей звука определены коэффициенты сжимаемости. Значения полученных

скоростей звука и коэффициентов сжимаемости для указанных топлив в основном совпадают с полученными ранее данными исследований<sup>6</sup> [13] для углеводородных топлив аналогичных плотностей. Таким образом, полученные данные могут быть использованы для моделирования процесса подачи топлива в дизелях при их адаптации к работе на смесях дизельного топлива и пальмового масла.



Библиографический список

1. Отразится ли скандал вокруг Volkswagen на продажах дизельных автомобилей? [Электронный ресурс]. URL: <http://ru.euronews.com/2015/09/23/volkswagen-vw-scandal/> (12.04.2018).
2. Мировой рынок пальмового масла в 2016/17 МГ – новые рекорды производства и экспорта [Электронный ресурс]. URL: [www.oilworld.ru/analytics/worldmarket/261792](http://www.oilworld.ru/analytics/worldmarket/261792) (12.04.2018).
3. Марков В.А., Девянин С.Н., Семенов В.Г. [и др.]. Использование растительных масел и топлив на их основе в дизельных двигателях. М.: ОООНИЦ «Инженер»; ООО «Онико-М», 2011. 536 с.
4. Rashed M.M., Kalam M.A., Masjuki H.H., Mofijur M., Rasul M.G., Zulkifli N.W.M., Performance and emission characteristics of a diesel engine fueled with palm, jatropha, and moringa oil methyl ester, *Industrial Crops and Products*, 79. 2016. P. 70–76.
5. Sanjid A., Masjuki H.H., Kalam M.A., Rahman A.S.M., Abedin M.J., Palash S.M.: Production of palm and jatropha based biodiesel and investigation of palm–jatropha combined blend properties, performance, exhaust emission and noise in an unmodified diesel engine. *J. Clean. Prod.* 65. 2014. P. 295–303.
6. Mosarof M.H., Kalam M.A., Masjuki H.H., Ashraful A.M., Rashed M.M., Imdadul H.K., Monirul I.M. Implementation of palm biodiesel based on economic aspects, performance, emission, and wear characteristic. *Energy conversion and Management*. 105. 2015. 617–629.
7. Gumpon Prateepchaikul, A. Teerawat. Palm oil as a fuel for agricultural diesel engines: Comparative testing against diesel oil – 2003. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.journeytoforever.org/biodiesel\\_SVO-palm.html](http://www.journeytoforever.org/biodiesel_SVO-palm.html) (12.04.2018).
8. Barthélémy de Theux. Utilisation de l'huile de palme comme combustible dans les moteurs diesel – 2004. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.codeart.org/pdf/dossier/2004-utilisation-de-l-huile-de-palme-comme-carburant-dans-les-moteurs-diesel-resume.pdf> (12.04.2018).
9. Kalam M.A., Masjuki H.H., Jayed M.H., Liaquat A.M., Emission and performance characteristics of an indirect ignition diesel engine fuelled with waste cooking oil. *Energy*. 2011. Vol. 36 (1). P. 397–402.
10. Ndayishimiye P., Tazerout M. Use of palm oil-based biofuel in the internal combustion engines: performance and emissions characteristics. *Energy*. 2011. Vol. 36 (3). P. 1790–1796.
11. Song H., Tompkins B.T., Bittle J.A., Jacobs T.J. Comparisons of No emissions and soot concentrations from biodiesel-fuelled diesel engine. *Fuel*, 2012. Vol. 96. P. 446–453.
12. Кадиата Э.Ч., Славуцкий В.М., Курапин А.В., Салькин Е.А. Перспективы использования пальмового масла в качестве топлива для транспортных дизелей // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2017. № 4 (58). С. 143–148.
13. Астахов И. В. Сжимаемость моторных топлив // Энергомашиностроение, 1960. № 9. С. 8–11.
14. Марков В.А. Влияние состава смесового биотоплива на параметры процесса впрыскивания топлива в дизеле // Тракторы и сельхозмашины. 2014. № 12. С. 3–9.
15. Shahabuddin M., Liaquat A.M., Masjuski H.H., Kalam M.A., Monfijur M. Ignition delay, combustion and emission characteristics of diesel engine fueled with biodiesel // *Renewable & sustainable Energy reviews*. 2013. Vol. 21. P. 623–632.
16. Ndiaye E.I. Characterisation thermophysique des biodiesels: vitesse du son, densité, compressibilité / *Energetique – thèse doctorale Université de PAU et des pays de l'Adour. FRANCE: Ecope*. 2012.

References

1. *Otrazitsya li skandal vokrug Volkswagen na prodazhah dizel'nyh avtomobilej?* [Will the scandal around Volkswagen affect the sales of diesel cars?]. Available at: <http://ru.euronews.com/2015/09/23/volkswagen-vw-scandal/> (12 April, 2018).
2. *Mirovoj ryok pal'movogo masla v 2016/17 MG – novye rekordy proizvodstva i eksporta* [The global palm oil market in 2016/2017 MY – new production and export records]. Available at: [www.oilworld.ru/analytics/worldmarket/261792](http://www.oilworld.ru/analytics/worldmarket/261792) (12 April, 2018).
3. Markov V.A., Devyanin S.N., Semenov V.G. *Ispol'zovanie rastitel'nyh masel i topliv na ih osnove v dizel'nyh dvigatelyah* [Use of vegetable oils and vegetable oil-based fuels in diesel engines]. Moscow: Research center «Engineer» LLC Publ.; «Oniko-M» JSC Publ., 2011, 536 p. (In Russian)
4. Rashed M.M., Kalam M.A., Masjuki H.H., Mofijur M., Rasul M.G., Zulkifli N.W.M., Performance and emission characteristics of a diesel engine fueled with palm, jatropha, and moringa oil methyl ester, *Industrial Crops and Products*, 79, 2016, pp. 70–76.
5. Sanjid A., Masjuki H.H., Kalam M.A., Rahman A.S.M., Abedin M.J., Palash S.M.: Production of palm and jatropha based biodiesel and investigation of palm–jatropha combined blend properties, performance, exhaust emission and noise in an unmodified diesel engine. *J. Clean. Prod.* 65, 2014, pp. 295–303.
6. Mosarof M.H., Kalam M.A., Masjuki H.H., Ashraful A.M., Rashed M.M., Imdadul H.K., Monirul I.M. Implementation of Palm biodiesel based on economic aspects, performance, emission, and wear characteristic. *Energy conversion and Management*. 105. 2015, pp. 617–629.
7. Gumpon Prateepchaikul, A. Teerawat. Palm oil as a fuel for agricultural diesel engines: Comparative testing against diesel oil – 2003. Available at:



[http://www.journeytoforever.org/biodiesel\\_SVO-palm.html](http://www.journeytoforever.org/biodiesel_SVO-palm.html) (12 April, 2018).

8. Barthélémy de Theux .Utilisation de l'huile de palme comme combustible dans les moteurs diesel – 2004. Available at: <http://www.codeart.org/pdf/dossier/2004-utilisation-de-l-huile-de-palme-comme-carburant-dans-les-moteurs-diesel-resume.pdf> (12 April, 2018).

9. Kalam M.A., Masjuki H.H., Jayed M.H., Liaquat A.M., Emission and performance characteristics of an indirect ignition diesel engine fuelled with waste cooking oil. *Energy*. 2011, vol. 36 (1), pp. 397–402.

10. Ndayishimiye P., Tazerout M. Use of palm oil-based biofuel in the internal combustion engines: performance and emissions characteristics. *Energy*. 2011, vol. 36 (3), pp. 1790–1796.

11. Song H., Tompkins B.T., Bittle J.A., Jacobs T.J. Comparisons of NO emissions and soot concentrations from biodiesel-fuelled diesel engine. *Fuel*, 2012, vol. 96, pp. 446–453.

12. Kadiata E.Ch., Slavutskiy V.M., Kurapin A.V., Salykin E.A. Application prospects of palm oil as a fuel

for diesel engines. *Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta* [Scientific notes of the Crimean engineering and pedagogical university], 2017, no. 4 (58), pp. 143–148. (In Russian)

13. Astahov I.V. Compressibility of motor fuels. *Energomashinostroenie* [Power Plant Engineering], 1960, no. 9, pp. 8–11. (In Russian)

14. Markov V.A. Influence of mixed biofuel composition on the parameters of fuel injection process in diesel engine. *Traktory i sel'hozmashiny* [Tractors and Agricultural Machines], 2014, no. 12, pp. 3–9. (In Russian)

15. Shahabuddin M., Liaquat A.M., Masjuski H.H., Kalam M.A., Monfijur M. Ignition delay, combustion and emission characteristics of diesel engine fueled with biodiesel // *Renewable & sustainable Energy reviews*. 2013, vol. 21, pp. 623–632.

16. Ndiaye E.I. Caracterisation thermophysique des biodiesel: vitesse du son, densité, compressibilité / *Energetique – thèse doctorale Université de PAU et des pays de l'Adour. FRANCE: Ecope*. 2012.

#### Критерии авторства

Кадията Э.Ч., Славутский В.М., Курапин А.В., Салыкин Е.А. провели экспериментальные исследования по определению коэффициентов сжимаемости дизельного топлива и его смесей с пальмовым маслом, а также чистого пальмового масла, проанализировали полученные результаты, подготовили текст статьи. Авторы несут ответственность за плагиат.

#### Authorship criteria

Kadiata E.Ch., Slavutsky V.M., Kurapin A.V., Salykin E.A. have conducted experimental studies on determining the compressibility coefficients of diesel fuel and its mixtures with palm oil, as well as pure palm oil, analyzed the results obtained, and prepared the manuscript. The authors bear the responsibility for plagiarism.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.



Оригинальная статья / Original article

УДК 625.7

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-10-189-202>

## ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ СТРАТЕГИИ И ИНСТРУМЕНТАРИЯ ОПТИМИЗАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ КРУПНЫХ ГОРОДОВ И АГЛОМЕРАЦИЙ

© И.Н. Макаров<sup>1</sup>

Липецкий филиал ФГБОУ ВО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации», 398600, Российская Федерация, г. Липецк, ул. Интернациональная, 12 б.

**РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ.** Данная работа посвящена анализу возможностей развития транспортных систем крупных городов и городских агломераций. В работе основное внимание уделяется проблеме формирования и эффективного использования транспортного пространства современного города в условиях исчерпанности свободных земельных участков для экстенсивного расширения дорожной сети на основе взаимодействия скоростных городских автомобильных магистралей, рельсового и традиционного общественного транспорта. Целью данной работы является разработка теоретических основ повышения эффективности использования пространств города и городской агломерации, а также формирования оптимальной стратегии развития городской системы перевозок и организации движения, функционирующей на основе взаимодействия рельсового и колесного транспорта. **МЕТОДЫ.** В работе использовались такие методы научного анализа, как диалектический, сравнительно-экономический и статистический, системный, системно-функциональный и историко-генетический, экономико-математическое моделирование, теории управления организационно-экономическими системами и метод научной абстракции. Комплексное их применение позволило обеспечить достоверность проведенного исследования. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** В работе на основании тенденции роста автомобилизации населения крупных городов доказана необходимость кардинального изменения подхода к формированию и функционированию городской транспортной системы, высказаны предположения по повышению эффективности использования транспортного пространства городов и городских агломераций, сформулированы критерии, на базе которых возможно определить эффективность использования транспортного пространства города. Автором сформулированы, обоснованы и раскрыты мероприятия, способствующие повышению эффективности использования транспортного пространства города. **ВЫВОДЫ.** Необходимость разработки оптимальной стратегии вызвана объективной потребностью в ней, связанной с существенным ростом автомобилизации населения крупных городов при фактической исчерпанности возможностей экстенсивного развития транспортной сети. В качестве основных благ, производство которых должно увеличиться в процессе реструктуризации, развития и модернизации городской транспортной системы, прежде всего, следует выделить снижение общей величины транспортных затрат в себестоимости продукции, производимой предприятиями, находящимися в зоне осуществления или влияния проекта реструктуризации транспортной системы города. Далее, следует отметить в качестве блага повышение уровня промышленно-производственного потенциала территории, на которой реализуется проект по развитию или реструктуризации транспортной инфраструктуры. Итоговым результатом проводимых мероприятий должно быть повышение уровня транспортной доступности территорий, населенных пунктов агломерации и объектов, ведущих хозяйственную, социально-значимую или иную деятельность, расположенных на территории крупного города или агломерации и повышение безопасности грузовых и, в первую очередь, пассажирских перевозок.

**Ключевые слова:** городская транспортная система, агломерация, сеть, дорога, транспорт, территория.

**Информация о статье.** Дата поступления 13 августа 2018 г.; дата принятия к печати 28 сентября 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 октября 2018 г.

**Формат цитирования.** Макаров И.Н. Теоретико-методологический подход к разработке стратегии и инструментария оптимизации транспортных систем крупных городов и агломераций // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 10. С. 189–202. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-189-202

<sup>1</sup>Макаров Иван Николаевич, кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики, менеджмента и маркетинга, e-mail: excellenzz@mail.ru  
Ivan N. Makarov, Candidate of Economics, Associate Professor of the Department of Economics, Management and Marketing, e-mail: excellenzz@mail.ru



## THEORETICAL AND METHODOLOGICAL APPROACH TO THE DEVELOPMENT OF STRATEGY AND TOOLS FOR LARGE CITY AND AGGLOMERATION TRANSPORT SYSTEM OPTIMIZATION

I.N. Makarov

Finance University under the Government of the Russian Federation, Lipetsk branch,  
12 b, Internatsionalnaya St., Lipetsk, 398600, Russian Federation

**ABSTRACT. PURPOSE.** The paper deals with the analysis of the development possibilities of transport systems in large cities and urban agglomerations. The work focuses on the problem of formation and effective use of the modern city transport space in the context of lack of free land for extensive expansion of road network based on the interaction of high-speed urban highways, rail and traditional public transport. The purpose of this work is to develop the theoretical foundations of increasing efficiency of using the city and urban agglomeration areas and forming an optimal development strategy for the urban transportation system and traffic management operating on the basis of rail and wheeled vehicles interaction.

**METHODS.** The work uses the following methods of scientific analysis: dialectical, comparative-economic and statistical, system, system-functional and historical-genetic, economic-mathematical modeling, theories of organizational and economic system management and the method of scientific abstraction. Their complex use allow to ensure the reliability of the conducted research. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** Based on the tendency of growing motorization of the large city population the work substantiates the need for the cardinal change of the approach to urban transport system formation and operation. The proposals are developed to improve the efficiency of using the transport space of cities and urban agglomerations. Criteria for determining the efficiency of city transport space use are given. The author has formulated, justified and described the measures aimed at increasing the efficiency of the use of the transport space of the city.

**CONCLUSIONS.** The need to develop an optimal strategy is objective since on one hand, there is a significant increase in the motorization of large city population and on the other hand, the possibilities for transport network extensive development have come to the end of their resources. The main advantages of the strategy, the number of which will increase in the process of restructuring, development and modernization of the urban transport system, primarily are reduction in the total amount of transport costs in the cost of production manufactured by enterprises located in the area of implementation or influence of the project of city transport system restructuring. Another advantage is growth of the level of the industrial and production potential of the area where the project on transport infrastructure development or restructuring is implemented. The final result of the taken measures should be an increase in the level of transport accessibility of the areas, agglomeration settlements and facilities engaged in economic, socially significant or other activity, which are located on the territory of a large city or agglomeration as well as improving the safety of freight and first of all passenger transportation.

**Keywords:** *urban transport system, agglomeration, network, road, transport, area*

**Information about the article.** Received August 13, 2018; accepted for publication September 28, 2018; available online October 31, 2018.

**For citation.** Makarov I.N. Theoretical and methodological approach to the development of strategy and tools for large city and agglomeration transport system optimization. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 10, pp. 189–202. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-189-202. (In Russian).

### Введение

Приступая к исследованию проблем оптимизации транспортных систем крупных городов [1–12] и разработке стратегии оптимизации данных систем, в первую очередь необходимо определиться с категориальным аппаратом исследования.

Прежде всего, необходимо численно определить категорию «крупный город».

Как отмечено в своде правил «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений» от Минрегионразвития РФ, к категории крупных городов

относятся города с численностью населения от 250000 до 1000000 человек. При этом в данной категории выделяются подкатегории городов с населением 250000–500000 и 500000–1000000 человек.

Таким образом, объектом нашего исследования выступают системы и сети грузовых и пассажирских перевозок городов с населением 250000–500000 и 500000 – 1000000 человек, при этом основное внимание будет уделено системам активно развивающихся городов с населением 500000–



1000000 человек, поскольку вопросы транспортного обеспечения данных городов стоят наиболее остро.

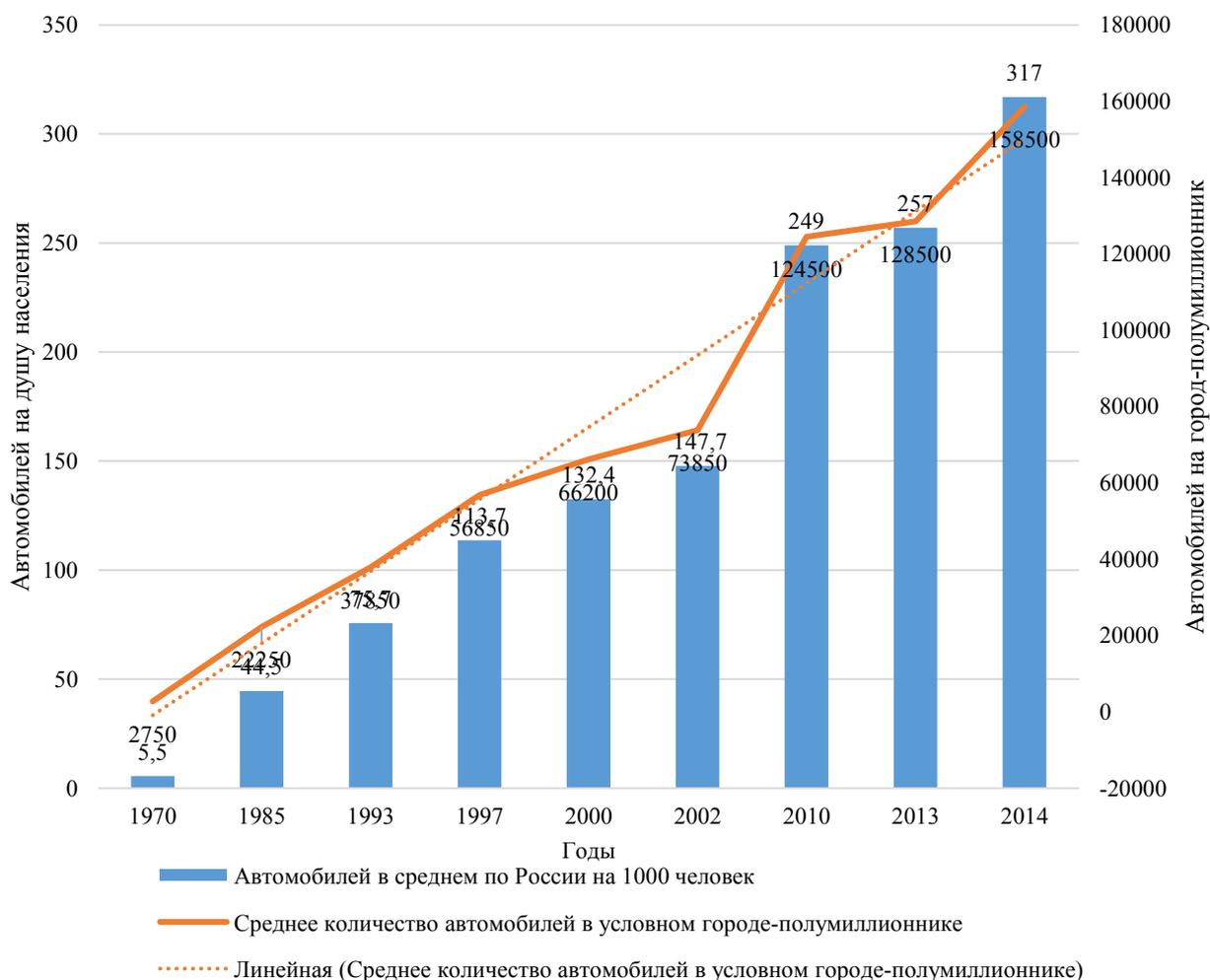
Основанием для данного вывода выступают:

1. Гипотеза, что в большинстве случаев основой транспортной сети городов данной категории выступает дорожная сеть, расчет и строительство которой производились еще во времена СССР, и которая в дальнейшие периоды в некоторых городах модернизировалась, частично оптимизировалась, однако не претерпела кардинальных изменений. В качестве подтверждения данной гипотезы выступают транспортные сети городов: Липецка, Тамбова, Воронежа

(без кардинальных трансформаций за последнее 20-летие).

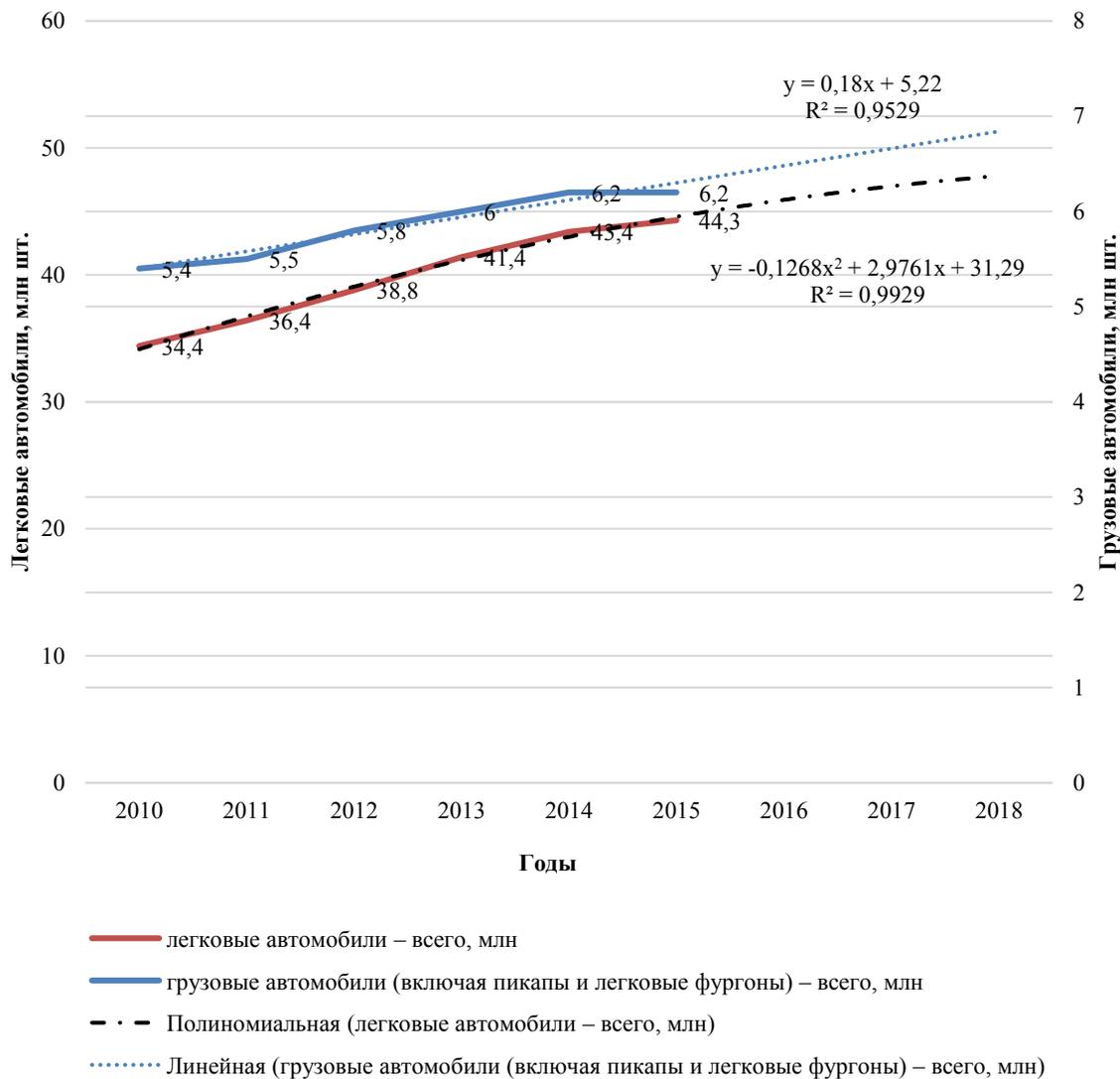
2. Гипотеза, что значительная часть населения стремится предпочесть услугам городского общественного транспорта частный автотранспорт (личные легковые автомобили) – данное положение можно отчасти подтвердить анализом предпочтений населения различных возрастных категорий в данных городах. Рассмотрим теперь темпы автомобилизации населения страны.

По данным Росстата и материалам Википедии, автором был построен следующий график, отображающий уровень автомобилизации крупных городов России (рис. 1, 2).



**Рис. 1. Изменение уровня автомобилизации населения России и СССР и динамика количества автомобилей в условном усредненном российском городе с населением 500000 человек (построено автором по данным Росстата)**

**Fig. 1. Variations in the motorization level of the population of Russia and the USSR and the dynamics of the number of motor cars in a conditional average Russian city with the population of 500 000 people (built by the author according to Rosstat data)**



**Рис. 2. Динамика и прогноз роста автомобильного транспорта, находящегося в частном владении в Российской Федерации**

**Fig. 2. Dynamics and forecast of growth of the number of private motor vehicles in the Russian Federation**

Таким образом, необходимо сделать вывод, что в настоящее время в развитии транспортной системы типичного крупного города в России доминируют следующие тенденции:

- Существенный рост количества легковых автомобилей, находящихся в индивидуальном владении (владении домохозяйства), и служащих, главным образом, для доставки владельца и членов его семьи или сослуживцев в среднем менее одного

человека к месту работы и обратно. Косвенным подтверждением данного вывода являются данные, приведенные в исследовании Н.А. Ковалевой, иллюстрирующие среднюю наполняемость салона легкового автомобиля на городских улицах Ростова-на-Дону – считая загрузку автомобиля в Ростове-на-Дону типичной для российского города, средняя загруженность легкового автомобиля в городах составляет менее двух (округленно, равна двум) человек<sup>2</sup>.

<sup>2</sup>Ковалева Н.А. Пространственно-технологическое развитие городских пассажирских транспортных систем: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.01. Ростов-на-Дону, 2015. 150 с. / Kovaleva N.A. Spatial and technological development of urban passenger transport systems: Candidate's Dissertation in Technical Sciences: 05.22.01. Rostov-on-Don, 2015. 150 p.



- Снижение спроса со стороны населения на услуги муниципального транспорта – при наличии финансовой возможности большинство городских жителей предпочитают услугам общественного транспорта индивидуальный транспорт – это, скорее всего, обусловлено тем, что темпы автомобилизации очень близки к темпам роста доли граждан, предпочитающих использовать в поездках по городу личные автомобили.

- Появление значительного количества маршрутных автобусов, составляющих конкуренцию муниципальному транспорту, находящихся в частном владении (данный пункт значим в случае неравенства условий функционирования муниципального транспорта и частных маршрутных автобусов, в том числе, касающихся тарифов и способов оплаты поездок, как это имеет место в некоторых городах России (Липецк, Тамбов, Воронеж).

Данные выводы, считаем, подтверждают ранее выдвинутые гипотезы в достаточной степени.

3. Предположение, что за последние годы (после 1992 г.) в некоторых крупных городах России происходило сокращение путей и маршрутов транспорта, обладающего собственным транспортным пространством (или выделенными линиями движения), чье движение независимо от основного транспортного потока на улицах города (за исключением метрополитена в городах-миллион-

никах) как это было сделано в таких городах как: Воронеж и Липецк, где часть маршрутов трамвайной сети вообще не дублировалась иными видами транспорта.

4. Дополнительной гипотезой будет предположение, что социально-экономическое развитие и, как следствие, уровень благосостояния в условиях докризисного периода росли наиболее быстрыми темпами в крупных городах.

Соответственно, предполагая, что социально-экономическое развитие города сопровождается повышением уровня благосостояния граждан, а рост благосостояния, в свою очередь, вызывает рост автомобилизации. При этом другим аспектом экономического роста в городе является возрастание цены на землю и увеличение плотности застройки.

В результате приходим к выводу, что крупные города России при сохранении тенденции автомобилизации населения и, в значительной степени, исчерпанности возможностей экстенсивного развития транспортной сети вследствие практически полного отсутствия незанятых (свободных от хозяйственной деятельности и иного функционального назначения) земель в городах, в ближайшем будущем будут остро нуждаться в формировании и реализации новой стратегии и технологии развития городских транспортных систем для обеспечения транспортной доступности города в целом и его отдельных частей.

### Транспортное пространство города и агломерации: определение и использование

Таким образом, темпы роста автомобилизации городского населения с течением времени нарастают и, наиболее вероятно, что в будущем в предельном выражении уровень автомобилизации будет приближаться к показателю 1 автомобиль на 1 взрослого городского жителя. В свою очередь, процесс землеотведения под сетевую дорожную инфраструктуру (проезжие части, развязки мосты) не может нарастать аналогичными темпами вследствие практически полной исчерпанности свободных земельных ресурсов в подавляющем большинстве

крупных городов страны на нынешнем этапе их развития. Как следствие, необходимо увеличить пропускную способность городских транспортных систем (ГТС) при минимальном увеличении площади земель, относимых к ГТС.

Опираясь на вышеприведенные выводы и прогнозы, а также в соответствии с результатами работы предыдущих исследователей, касающихся функционирования транспортных систем городов в современных условиях, мы предполагаем в ближайшем будущем необходимость трансформации



ций и эволюционного развития транспортных систем крупных городов как единственной возможности избежать транспортного коллапса<sup>3,4</sup> [13–20].

Проведем частичную аналогию между автомобильным и железнодорожным транспортом. В системе железнодорожного транспорта транспортное пространство подразделяется на пространство движения поездов и пространство путевой инфраструктуры.

Таким образом, «транспортное пространство, с одной стороны, интегрирует использование всех остальных производственных ресурсов, а с другой – задает для них определенные ограничения. Поэтому повышение производительности транспортного пространства является ключевым фактором роста эффективности системы городских пассажирских (и грузовых) перевозок.

Пространство, выделенное для транспортной деятельности, является ее ключевым ресурсом и, одновременно, исключается из ресурсного потенциала иных видов деятельности.

Соответственно, эффекты, которые могли бы быть получены в результате использования данного пространства в рамках иных видов деятельности, являются альтернативными издержками при использовании его в качестве транспортного пространства. Поэтому целесообразность принятия решения об использовании данного пространства для транспортной деятельности должна основываться на достигаемой в результате более высокой совокупной (макроэкономической) эффективности, чем при использовании его для иных видов деятельности» [17, с. 165].

### Возможности повышения эффективности использования транспортного пространства города и агломерации

Повысить эффективность использования пространства движения поездов можно главным образом за счет повышения скорости движения и за счет повышения его грузоподъемности или пассажироместимости.

Соответственно, спроецировав возможности повышения эффективности транспортного пространства железнодорожного транспорта на городскую транспортную систему, мы можем заключить, что повысить эффективность использования транспортного пространства крупного города можно следующими способами:

1. Введением безостановочного движения на отдельных особо значимых участках городских магистралей, максимально исключив светофорное регулирование и убрав с дорожного полотна пешеходные переходы – в данном случае можно оценить

время задержки транспортного потока с учетом времени реакции водителя и потерь времени на торможение и последующий набор скорости.

2. Повысив скорость транспортного потока на магистральных улицах, т.е. рассмотрев возможность повышения разрешенной скорости движения на городских магистралях с нынешних 60 км/ч до 70, 80 или, например, 90 км/ч (данное повышение должно быть обосновано соответствующими теоретическими расчетами).

3. Разработав и реализовав проекты строительства многоуровневых дорог, развязок и пересечений с путевой инфраструктурой других видов транспорта, что в существенной степени снизит вероятность заторов, возникающих из-за снижения пропускной способности дороги в месте ее пересечения с другой дорогой.

<sup>3</sup>Пугачев И.Н. Теоретические принципы и методы повышения эффективности функционирования транспортных систем городов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.01. Екатеринбург, 2010. 367 с. / Pugachev I.N. Theoretical principles and methods of improving operation efficiency of urban transport systems: Doctoral Dissertation in Technical Sciences: 05.22.01. Ekaterinburg, 2010. 367 p.

<sup>4</sup>Шафиркин Б.И. Единая транспортная сеть и взаимодействие различных видов транспорта: учебник для вузов. М.: Высш. шк., 1977. 240 с. / Shafirkin B.I. Single transport network and interaction of different types of transport: a textbook for universities. M.: Vysshaya Shkola, 1977. 240 p.



4. Создав соответствующие условия, способствующие перераспределению части пассажиропотока с личных автомобилей на городской общественный транспорт (удобство маршрутов, оптимальная тарифная политика и иные меры стимулирующего и, возможно, в критических случаях, принудительного воздействия – например, европейский опыт ряда городов, предполагающий запрет в определенные дни выезжать автомобилям с четными или нечетными номерами).

5. Разработкой и использованием интеллектуальных транспортных систем – средств автоматического регулирования движения транспортного потока и управления светофорами в рамках не только одного пересечения, но и в рамках отдельных, тесно связанных частей городской транспортной системы, а в идеальном варианте – в рамках всех магистральных и основных, а также существенной части «капиллярных» улиц, входящих в городскую транспортную систему.

6. За счет оптимизации топологии городской транспортной сети.

Либо можно найти альтернативное решение, которое будет заключаться в реализации одного или нескольких из предложенных мероприятий в сочетании с развитием системы общественного транспорта в городе и совершенствования межмодального взаимодействия в пределах города и/или городской агломерации.

Главными вопросами и «болевыми точками» разработки стратегии оптимизации транспортной сети крупного города и/или городской агломерации в данном случае являются:

1. Формирование достаточного инвестиционного потока для создания эффективной мультимодальной транспортной системы.

2. Хеджирование рисков, связанных с инвестированием и строительством сетевой транспортной инфраструктуры и инфраструктурных объектов, имеющих следующий характер:

- финансовые риски;
- технико-технологические риски

(например, риски, связанные с возможностью формирования интенсивного потока отказов техники в отечественных климатических условиях).

3. Трансформация траффика, главным образом пассажирского, требующая формирования системы специальных обслуживающих объектов:

- строительство пассажирских терминалов или иных межмодальных пересадочных пунктов;

- строительство системы перехватающих парковок бесплатного и платного пользования;

- создание системы скоростного пассажирского транспорта, обладающего собственным транспортным пространством, независимым и не пересекающимся с транспортным пространством автомобильного транспорта.

4. Задача оптимизации землеотведения и корреляции с градостроительной политикой.

При этом одной из наиболее значимых теоретических задач является задача разработки математического алгоритма, аналогичного алгоритму Крускала (Краскала), позволяющего провести оптимизацию пространственной структуры сетей различных видов транспорта с учетом различной стоимости земли и различных возможностей землеотведения в различных районах города и агломерации.

При формировании модели согласования интересов в процессе оптимизации развития сетей и дорог агломерации и модели замены автомобиля на трамвай или иные виды транспорта с выделенным пространством, в качестве независимой внешней (экзогенной) переменной, существенно влияющей на результат выбора оптимального типа подвижного состава и топологии сети, необходимо выделить стоимость земли, на которой будут располагаться элементы транспортного пространства города (агломерации).

Информационно-графическая модель территориально-транспортного баланса крупного города представлена ниже (рис. 3).

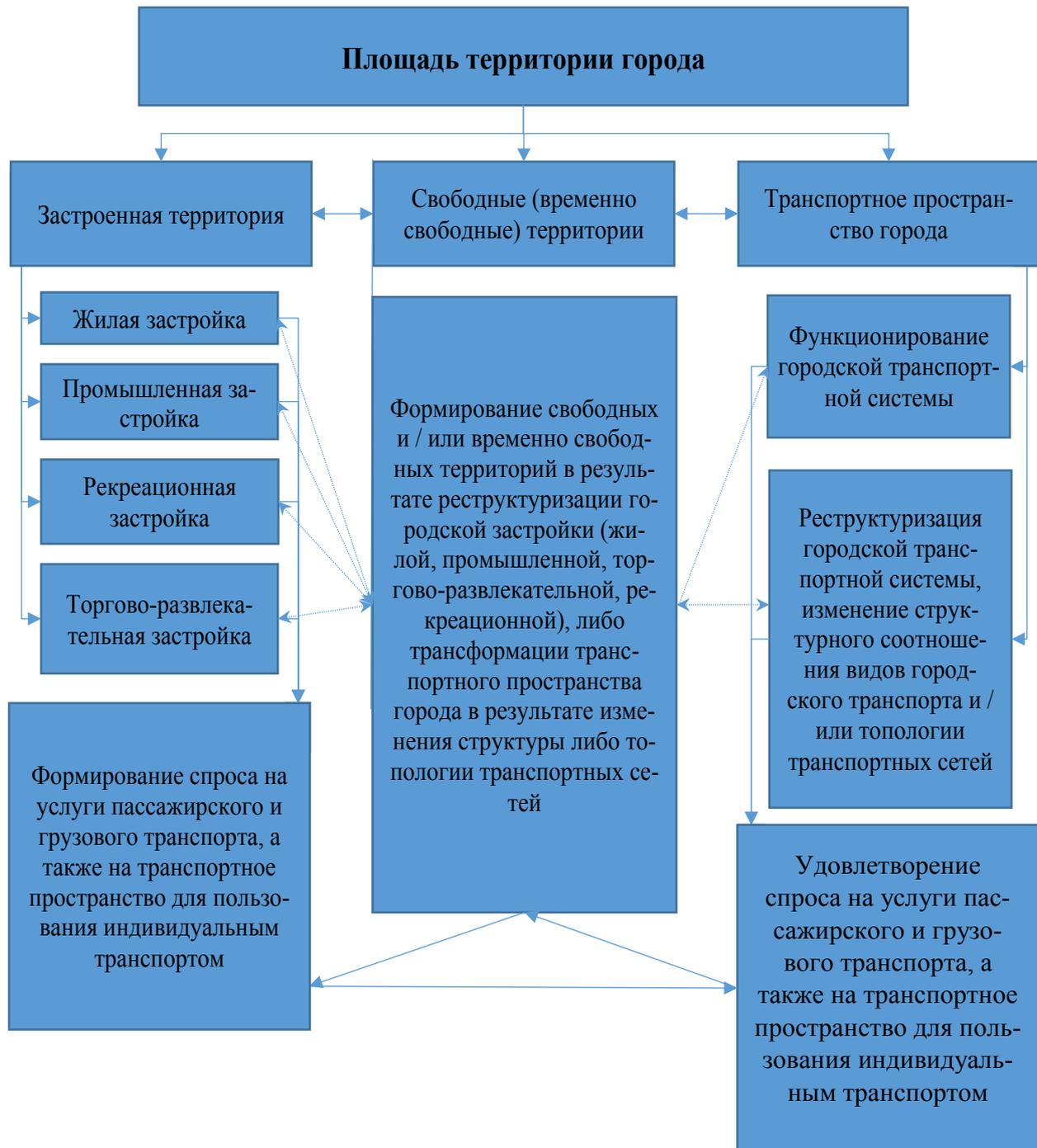


Рис. 3. Информационно-графическая модель территориально-транспортного баланса крупного города

Fig. 3. Information and graphic model of the territorial and transport balance of a large city

Именно от стоимости земли зависит выбор оптимальной топологии сети, а также стоимость земельных участков, высвобождаемых в процессе трансформации транспортной сети агломерации, может служить одним из источников финансирования раз-

вития данной сети какого-либо вида городского транспорта в частности, и всей транспортной системы агломерации в целом.

Также для возможности разработки эффективной стратегии оптимизации транспортной системы крупного города и/или го-



родской агломерации следует решить вопрос о формировании алгоритма обоснования управленческого решения о частичной или полной рекомбинации (например, с ав-

томобильного на трамвайное) транспортного пространства или совместном использовании ограниченных земельных ресурсов городской агломерации различными видами транспорта.

### Мероприятия и задачи по повышению эффективности использования транспортного пространства города и агломерации

Рассмотрим теоретические подходы к формированию оценки эффективности использования транспортного пространства города и построению алгоритма принятия решения о выделении земель под формирование и трансформацию его структуры. Намечаем в данной проблеме необходимость решения следующих задач:

1. Формирование методики оценки эффективности функционирования транспортного пространства города в разрезе следующих составляющих:

- Оптимальность существующей топологии сетей городского транспорта (индивидуального, промышленного, городского пассажирского).

- Оптимальность организации дорожного движения в рамках существующей топологии сетей городского автомобильного транспорта – это включает:

- оптимальность формирования потоков транспортных средств на пересечении магистралей и организации движения на данных пересечениях.

- оптимальность существующих развязок (требуется сформировать общий алгоритм определения оптимальности развязок).

- правильность отнесения участков уличной дорожной сети городов к улицам соответствующих категорий (магистральные, «капиллярные»).

- оптимальность пешеходных переходов и пересечений с линиями других видов транспорта, расположенных на одном уровне, в частности, пересечений с трамвайными путями, находящимися на проезжей части автомобильной дороги, а также городского или магистрального железнодорожного транспорта.

- Оптимальность распределения существующего пассажирского транспортного потока по видам городского транспорта.

Решение данных вопросов будет формировать стратегию оптимального развития городской транспортной системы агломерации (рис. 4).

В настоящее время одной из основных целей модернизации транспортной инфраструктуры крупного города и/или агломерации является обеспечение возможности развития промышленных и торговых предприятий городов России, влекущее снижение доли транспортных затрат в себестоимости продукции, а также повышение уровня транспортной доступности территорий, что должно повысить их хозяйственную, инвестиционную, рекреационную или иную привилегию.

Соответственно, в качестве основных мероприятий, способствующих увеличению эффективности работы городской транспортной системы, в соответствии с мировым опытом и вышеизложенными положениями может выступить:

1. Трансформация системы организации движения с выделением отдельных полос для городского общественного транспорта – в предельном выражении это сводится к развитию видов городского пассажирского транспорта, обладающего собственным транспортным пространством, и формированию их эффективного взаимодействия между собой и с автомобильным транспортом (условно данный спектр возможностей, с учетом имеющегося состояния техники, охватывает возможности от выделенной полосы для автобусного движения до городского железнодорожного транспорта).



*Рис. 4. Структура стратегии оптимального развития городской транспортной системы агломерации*

*Fig. 4. Structure of the strategy for optimal development of urban agglomeration transport system*

2. Внедрение системы внутригородских платных автомагистралей, взаимодействующих с системой «капиллярных» дорог, стоянок и развязов.

3. Активное развитие рельсового транспорта, обладающего собственным транспортным пространством, не имеющим пересечений с транспортным пространством колесного транспорта.

Внедрение подобных систем представляет особый интерес в сочетании с идеей о внедрении городских платных магистралей.

Городские скоростные автомагистрали в Японии и Австралии могут послужить примером внедрения подобных систем.

Однако для формирования подобного предложения необходимо изначально построить граф городской транспортной системы и провести анализ, чтобы узнать в какой степени внедрение подобных магистралей позволит решить проблему оптимизации транспортной доступности городских территорий.



В качестве одной из основных проблем внедрения системы платных дорог отдельными авторами называется проблема строительства контрольно-пропускных пунктов, разделяющих транспортные магистрали общественного бесплатного пользования от платной части транспортных путей ГТС.

В условиях плотной городской застройки и кардинальной нехватке места данная ситуация, при ее решении в рамках традиционных подходов, действительно могла бы стать проблемой. Однако в последнее время значительное развитие информационных технологий существенно снимает актуальность данного вопроса – в частности, решить эту проблему возможно следующим образом – установив приборы фиксации автомобилей, въезжающих на платную часть автомагистрали, функционирующих подобно системе контроля и предотвращения нарушений с последующей оплатой (подобно уже упомянутой системе контроля соблюдения правил дорожного движения). При этом в качестве промежуточного решения возможно выделение платных дорог на основных транспортных магистралях города (городской агломерации) – при этом дорожная разметка должна очень четко отграничивать платные полосы магистралей и платные магистрали от бесплатной части автомобильной дорожной сети города, что потребует внесения соответствующих изменений в правила дорожного движения – естественно, что штрафы за нарушение требований подобной разметки должны быть существенно (в разы или на порядок) больше расценок за движение по платным магистралям. Как вариант, возможно также возведение физических барьеров, отграничивающих платные линии магистралей или платные магистрали от бесплатных дорог.

Более того, широкое внедрение информационных технологий в систему организации и управления движением позволяет воплотить в реальность переменные тарифы, зависящие от маршрута движения транспортного средства – это может быть

достигнуто как за счет камер, установленных на платных и основных бесплатных транспортных магистралях города или агломерации, так и за счет оборудования пропускных пунктов или мест сопряжения платных и бесплатных автодорог и автомобилей (за счет автовладельцев) специальными электронными устройствами, позволяющими отслеживать маршрут и осуществлять расчеты в автоматическом режиме (оплата через транспондер).

Фактически предлагается аналог системы «Платон», функционирование которой предполагается за счет системы камер контроля, распространяющейся на городские платные магистрали и основные бесплатные дороги. Также данная система должна функционировать «в связке» с системами светофорного управления, распределения и перераспределения транспортных потоков на основных транспортных магистралях города.

Актуальным также остается вопрос эффективно функционирующих капиллярных дорог, функционально скоординированных с основными городскими магистралями – без наличия таковых эффективность функционирования ГТС будет непродуктивной, поскольку потоки автомобилей, съезжающих с основных магистралей, будут формировать заторы, которые, в предельном выражении, могут привести и к перекрытию основных городских магистралей.

При формировании модели выбора водителем частного автотранспортного средства в условиях наличия значительных заторов в транспортной сети следует учитывать, что он будет осуществляться из следующих базисных вариантов:

1. Ехать по платной дороге.
2. Ехать по бесплатной дороге с пробками.
3. Воспользоваться общественным транспортом.
4. Воспользоваться скоростным общественным транспортом (при большей цене за проезд).

Однако необходимо учитывать, что в современном городе система платных дорог



должна функционировать в сочетании с возможностью пересадки на скоростной и доступный (как в ценовом аспекте, так в аспекте времени ожидания – интервала движения, скорости передвижения и оптимальности маршрутной сети) общественный транспорт.

При этом линии городского общественного транспорта можно финансировать, наряду с бюджетным финанси-

рованием, за счет потока доходов от функционирования платных объектов инфраструктуры (дорог и парковок). Однако при этом необходимо, чтобы перехватывающие парковки были бесплатными, поскольку это, наиболее вероятно, существенно повлияет на эффективность всей идеи «разгрузки» центра города и основных магистралей за счет внедрения платных и бесплатных инфраструктурных объектов.

### Выводы

Необходимость разработки оптимальной стратегии вызвана объективной потребностью, связанной с существенным ростом автомобилизации населения крупных городов при фактической исчерпанности возможностей экстенсивного развития транспортной сети.

Оптимальная транспортная стратегия в ходе ее реализации должна способствовать следующим критериям:

1. Снижение величины транспортных затрат грузоперевозчиков и временных потерь на транспортные действия (поездка, поиск парковки, парковка, пересадка с одного вида транспорта и пр.) жителей города.
2. Повышение транспортной доступности районов города и/или агломерации.
3. Снижение аварийности в транспортной системе города и/или агломерации.
4. Повышение эффективности использования земельного фонда, на котором располагается транспортное пространство города или городской агломерации.

В качестве основных благ, производство которых должно увеличиться в процессе реструктуризации, развития и модернизации городской транспортной системы, следует выделить:

1. Снижение общей величины транспортных затрат в себестоимости продукции, производимой предприятиями, находящимися в зоне осуществления или влияния проекта реструктуризации транспортной системы города.
2. Повышение уровня промышленно-производственного и инвестиционного по-

тенциала территории, на которой реализуется проект по развитию или реструктуризации транспортной инфраструктуры, что будет характеризовать внешний эффект данного проекта в разрезе его социальной и бюджетной эффективности.

3. Повышение уровня транспортной доступности территорий населенных пунктов агломерации и объектов, ведущих хозяйственную, социально-значимую или иную деятельность, расположенных на территории крупного города или агломерации. Необходимость выделения транспортной доступности в качестве одной из важнейших характеристик степени развитости и результата функционирования транспортной инфраструктуры объясняется социально-экономической сущностью и предназначением транспортной инфраструктуры – обеспечение условий для беспрепятственного и безопасного перемещения в пространстве грузов и пассажиров. Объемы производства данного блага можно оценить как непосредственно, так и опосредованно, с помощью показателей, характеризующих затраты времени и потери от временных затрат, возникающих вследствие совершения транспортных операций.

4. Повышение безопасности грузовых и в первую очередь пассажирских перевозок. Необходимость выделения данного блага в качестве основного блага, непосредственно связанного с параметрами, характеризующими социально-экономическую эффективность, проистекает из отмеченной сущности и социально-экономического



предназначения транспортной системы города. Объемы производства данного блага могут быть оценены посредством показателей, характеризующих снижение аварийности, а именно: снижение общего количества происшествий на автомобильном и железнодорожном транспорте в пределах города или агломерации, вызванных состоянием

автомобильных дорог или путевой инфраструктуры как в абсолютном, так и в относительном (с учетом величины транспортного потока) выражении, снижением количества пострадавших и погибших в данных происшествиях, динамикой затрат на их лечение и реабилитацию, динамикой финансового ущерба, нанесенного данными происшествиями.

### Библиографический список

1. Ershova S., Smirnov E. Conceptual Justification of Town-Planning Design Standards for Streets and Roads in Large Cities for Ensuring Traffic Safety. *Transportation Research Procedia*, 20. 2017. P. 180–184.
2. Karpova G., Julmukhamedova G. Models for Estimating Human Capital Losses Due to Traffic-Related Deaths. *Transportation Research Procedia*, 20. 2017. P. 267–271.
3. Kerimov M., Safiullin R., Marusin A., Marusin A. Evaluation of Functional Efficiency of Automated Traffic Enforcement Systems. *Transportation Research Procedia*, 20. 2017. P. 288–294.
4. Kvitko A., Karpov B., Petukhov P., Ushakov A. Criteria for Substantiation of Rational Pavement Design as Bases of Traffic Safety throughout Life Cycle of Transport Structures. *Transportation Research Procedia*, 20. 2017. P. 384–392.
5. Lukinskiy V., Pletneva N., Gorshkov V., Druzhinin P. Application of the Logistics “Just in Time” Concept to Improve the Road Safety. *Transportation Research Procedia*, 20. 2017. P. 418–424.
6. Makarov I., Plotnikov V. Public-private partnership as a financial instrument for the transport infrastructure modernizing // *MATEC Web of Conferences*. 2018. P. 05012.
7. Акофф Р.Л. Планирование в больших экономических системах. М.: Советское радио, 1972. 224 с.
8. Андреев К.П. Совершенствование городской маршрутной сети // *Надежность и качество сложных систем*. 2017. № 3 (19). С. 102–106.
9. Баркалов С.А., Бакунец О.Н., Гуреева И.В.1, Колпачев В.Н., Руссман И.Б. Оптимизационные модели распределения инвестиций на предприятии по видам деятельности. М.: ИПУ РАН, 2002. 68 с.
10. Ванько В.И., Ермошина О.В., Кувыркин Г.Н. Вариационное исчисление и оптимальное управление. 3-е изд. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 488 с.
11. Варламов В.С., Галабурда В.Г., Казанский Н.Н. Экономическая география транспорта. М.: Транспорт, 1991. 280 с.
12. Дунаев О.Н. Проблемы управления транспортом в регионе в условиях перехода к рынку. М.: ГАУ, 1991. 219 с.
13. Мамаев Э.А., Ковалева Н.А. Железнодорожный транспорт в системе развития городского и пассажирского транспорта на примере г. Ростова-на-Дону // *Вестник Ростовского государственного экономического университета (РИНХ)*. 2013. № 4(44). С. 53–59.
14. Мамаев Э.А., Ковалева Н.А. К оценке потерь экономики от неэффективности организации движения в транспортной сети // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2014. № 2(54). С. 64–69.
15. Мамаев Э.А., Ковалева Н.А. Формирование скоростных маршрутов в городской транспортной системе [Электронный ресурс] // *Инженерный вестник Дона*. 2015. № 3. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3225> (14.05.2018).
16. Лапидус Б.М., Мачерет Д.А. Макроэкономическая роль железнодорожного транспорта: теоретические основы, исторические тенденции и взгляд в будущее. М.: КРАСАНД, 2014. 234 с.
17. Леонтьев Р.Г. Формирование единой региональной транспортной системы: Программно-целевой подход. М.: Наука, 1987. 152 с.
18. Лившиц В.Н. Системный анализ экономических процессов на транспорте. М.: Транспорт, 1986. 240 с.
19. Литвиненко Р.С., Павлов П.П., Аухадеев А.Э. Оценка влияния надежности элементов наземного городского электрического транспорта на его пропускную способность // *Надежность и качество сложных систем*. 2018. № 2 (22). С. 95–103.
20. Сайт Федеральной службы государственной статистики Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gks.ru> (14.05.2018).

### References

1. Ershova S., Smirnov E. Conceptual Justification of Town-Planning Design Standards for Streets and Roads in Large Cities for Ensuring Traffic Safety. *Transportation Research Procedia*, 20. 2017, pp. 180–184.
2. Karpova G., Julmukhamedova G. Models for Estimating Human Capital Losses Due to Traffic-Related Deaths. *Transportation Research Procedia*, 20. 2017, pp. 267–271.



3. Kerimov M., Safiullin R., Marusin A., Marusin A. Evaluation of Functional Efficiency of Automated Traffic Enforcement Systems. *Transportation Research Procedia*, 20. 2017, pp. 288–294.
4. Kvitko A., Karpov B., Petukhov P., Ushakov A. Criteria for Substantiation of Rational Pavement Design as Bases of Traffic Safety throughout Life Cycle of Transport Structures. *Transportation Research Procedia*, 20. 2017, pp. 384–392.
5. Lukinskiy V., Pletneva N., Gorshkov V., Druzhinin P. Application of the Logistics “Just in Time” Concept to Improve the Road Safety. *Transportation Research Procedia*, 20. 2017, pp. 418–424.
6. Makarov I., Plotnikov V. Public-private partnership as a financial instrument for the transport infrastructure modernizing // *MATEC Web of Conferences*. 2018. 05012 p.
7. Akoff R.L. *Planirovanie v bol'shikh ekonomicheskikh sistemah* [Planning in large economies]. Moscow: Sovetskoe radio Publ., 1972, 224 p. (In Russian)
8. Andreev K.P. Improvement of urban route network. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and Quality of Complex Systems], 2017, no. 3 (19), pp. 102–106. (In Russian)
9. Barkalov S.A., Bakunec O.N., Gureeva I.V.1, Korpachev V.N., Russman I.B. *Optimizacionnye modeli raspredeleniya investitsij na predpriyatii po vidam deyatel'nosti* [Optimization models of investment distribution at an enterprise by activity types]. Moscow: IPU RAN Publ., 2002, 68 p. (In Russian)
10. Van'ko V.I., Ermoshina O.V., Kuvyrkin G.N. *Variacionnoe ischislenie i optimal'noe upravlenie* [Variational calculus and optimal control]. Moscow: MG TU named after N.E. Bauman Publ., 2006, 488 p. (In Russian)
11. Varlamov V.S., Galaburda V.G., Kazanskij N.N. *Ekonomicheskaya geografiya transporta* [Economic geography of transport]. Moscow: Transport Publ., 1991, 280 p. (In Russian)
12. Dunaev O.N. *Problemy upravleniya transportom v regione v usloviyah perekhoda k rynku* [Problems of transport management in the region under transition to market]. Moscow: GAU Publ., 1991, 219 p. (In Russian)
13. Mamaev E.A., Kovaleva N.A. Railway transport in development of city passenger transport on the example of Rostov-on-Don. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta (RINH)* [Vestnik of Rostov State University of Economics], 2013, no. 4(44), pp. 53–59. (In Russian)
14. Mamaev E.A., Kovaleva N.A. On the assessment of economic loss from inefficient organization of traffic in a transport network. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya* [Vestnik RGUPS], 2014, no. 2(54), pp. 64–69. (In Russian)
15. Mamaev E.A., Kovaleva N.A. Formation of high-speed routes in the urban transport system. On-line journal “Engineering journal of Don”, 2015, no. 3. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3225> (accessed 14 May 2018).
16. Lapidus B.M., Macheret D.A. *Makroekonomicheskaya rol' zheleznodorozhnogo transporta: teoreticheskie osnovy, istoricheskie tendencii i vzglyad v budushchee* [Macroeconomic role of rail transport: theoretical foundations, historical trends and looks at the future]. Moscow: KRASAND Publ., 2014, 234 p. (In Russian)
17. Leont'ev R.G. *Formirovanie edinoj regional'noj transportnoj sistemy: Programmno-celevoj podhod* [Formation of a single regional transport system: program-target approach]. Moscow: Nauka Publ., 1987, 152 p. (In Russian)
18. Livshic V.N. *Sistemnyj analiz ekonomicheskikh processov na transporte* [System analysis of economic processes in transport]. Moscow: Transport Publ., 1986, 240 p. (In Russian)
19. Litvinenko R.S., Pavlov P.P., Auhadeev A.E. Evaluation of effect reliability influence on crossing capacity of ground city electric transport. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and Quality of Complex Systems], 2018, no. 2 (22), pp. 95–103. (In Russian)
20. *Sajt Federal'noj sluzhby gosudarstvennoj statistiki Rossijskoj Federacii* [Website of the Federal State Statistics Service of the Russian Federation]. Available at: <http://www.gks.ru> (accessed 14 May 2018).

#### Критерии авторства

Макаров И.Н. самостоятельно подготовил рукопись, разработал предложения по повышению эффективности использования транспортного пространства городов и городских агломераций, сформулировал критерии, на базе которых возможно определить эффективность использования транспортного пространства города. Автор несет ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

#### Authorship criteria

Makarov I.N. has prepared the manuscript for publication, developed the proposals to improve the efficiency of use of transport space of cities and urban agglomerations, formulated the criteria for determining the efficiency of urban transport space use. The author bears the responsibility for plagiarism.

#### Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.



Оригинальная статья / Original article

УДК 625.7

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-10-203-211>

## ВЛИЯНИЕ УРБАНИЗАЦИИ НА СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ТРАНСПОРТНОЙ И ТУРИСТИЧЕСКОЙ ОТРАСЛЕЙ РЕГИОНА

© А.Ю. Михайлов<sup>1</sup>, Е.Л. Попова<sup>2</sup>, И.Л. Гайворонский<sup>3</sup>

Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

**РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ.** В данной работе проведено изучение влияния урбанизации на социально-экономические аспекты транспортной и туристической отраслей региона. **МЕТОДЫ.** Транспортная инфраструктура туризма характеризуется нелинейными процессами. Нелинейность позволяет создавать и тестировать модели системы с реалистичными динамическими характеристиками и формировать модели разнообразных процессов. Наиболее перспективным методом для построения упрощенных описаний реальных процессов с целью изучения их поведения в различных возможных ситуациях является имитационное моделирование. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Имитационное моделирование – это теория, описывающая структуру и внутренние взаимодействия в системе. В основу структуры модели могут быть положены принципы динамического поведения системы с обратной связью, или модель может представлять собой описание некоторых наблюдаемых фрагментов системы. Модель, описывающая динамику процессов, способна изменять темпы и уровни для преобразования поведения системы во времени и в соответствии с задачами, для решения которых она была построена. **ВЫВОДЫ.** Установлено, что моделирование транспортной инфраструктуры туризма региона проводится для того, чтобы найти такое оптимальное ее состояние, которое бы соответствовало растущим транспортным и туристским потокам, предполагало бы альтернативные варианты развития транспортной системы, перераспределение транспортных потоков региона с целью снижения нагрузки на территорию, экологию и способы повышения удовлетворенности потребителей комплексом туристско-транспортных услуг, а также превращения транзитных пассажиров и туристов в туристов региона.

*Ключевые слова:* транспорт, урбанизация, регион, экономика, развитие, транспортная инфраструктура.

**Информация о статье.** Дата поступления 16 августа 2018 г.; дата принятия к печати 25 сентября 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 октября 2018 г.

**Формат цитирования.** Михайлов А.Ю., Попова Е.Л., Гайворонский И.Л. Влияние урбанизации на социально-экономические аспекты транспортной и туристической отраслей региона // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 10. С. 203–211. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-203-211

### URBANIZATION EFFECT ON SOCIAL AND ECONOMIC ASPECTS OF REGIONAL TOURISM AND TRANSPORT INDUSTRY

A.Yu. Mikhailov, E.L. Popova, I.L. Gaivoronskiy

Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

**ABSTRACT. PURPOSE.** The paper studies the influence of urbanization on the social and economic aspects of regional transport and tourism industries. **METHODS.** The tourism transport infrastructure is characterized by non-linear processes. Nonlinearity allows to create and test the models of the system with realistic dynamic characteristics and develop the

<sup>1</sup>Михайлов Александр Юрьевич, доктор технических наук, профессор кафедры автомобильного транспорта, e-mail: [mikhaylov\\_ay@mail.ru](mailto:mikhaylov_ay@mail.ru)

Alexander Yu. Mikhailov, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Motor Transport, e-mail: [mikhaylov\\_ay@mail.ru](mailto:mikhaylov_ay@mail.ru)

<sup>2</sup>Попова Екатерина Леонидовна, аспирант кафедры автомобильного транспорта, e-mail: [katerinapiskovec@mail.ru](mailto:katerinapiskovec@mail.ru)  
Ekaterina L. Popova Popova, Postgraduate of the Department of Motor Transport, e-mail: [katerinapiskovec@mail.ru](mailto:katerinapiskovec@mail.ru)

<sup>3</sup>Гайворонский Иван Леонидович, аспирант кафедры автомобильного транспорта, e-mail: [i\\_gaivoronskiy@mail.ru](mailto:i_gaivoronskiy@mail.ru)  
Ivan L. Gaivoronskiy, Postgraduate of the Department of Motor Transport, e-mail: [i\\_gaivoronskiy@mail.ru](mailto:i_gaivoronskiy@mail.ru)



models of various processes. Simulation modeling is the most promising method for building simplified descriptions of real processes in order to study their behavior in different possible situations. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** Simulation modeling is a theory that describes the structure and internal interactions in the system. The structure of the model can be based on the principles of dynamic behavior of a system with a feedback. Alternatively, the model can present a description of some observed fragments of the system. Describing process dynamics, the model can change the rates and levels for system's behavior transformation in time, and according to the tasks for which it was developed. **CONCLUSIONS.** It is found that modeling of regional tourism transport infrastructure aims at finding its optimum states which would correspond to the growing transport and tourist flows. It would also offer the alternatives of transport system development and redistribution of transport flows in the region in order to reduce the load on the territory and environment, propose the ways to increase customer satisfaction with the complex of tourist and transport services as well as present the methods to transform transit passengers and visitors into the tourists of the region.

**Keywords:** *transport, urbanization, region, economy, development, transport infrastructure*

**Information about the article.** Received August 16, 2018; accepted for publication September 25, 2018; available online October 31, 2018.

**For citation.** Mikhailov A.Yu., Popova E.L., Gaivoronskiy I.L. Urbanization effects on social and economic development of regional tourism and transport industry. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 10, pp. 203–211. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-203-211. (In Russian).

## Введение

Транспорт оказывает существенное влияние на экономику и развитие региона, способствуя притоку валюты в страну, созданию новых рабочих мест, улучшению инфраструктуры. В целях получения максимальной выгоды от транспорта каждое государство разрабатывает политику в транспортной сфере, которая является одним из видов социально-экономической политики государства.

Концентрация экономической активности и урбанизация выступали важным пространственным ресурсом глобального развития в течение длительного исторического периода.

Современные процессы роста, состава и размещения населения вызывают множество сложных проблем. Урбанизация является процессом, характеризующимся не только естественным, но и механическим приростом, например, миграциями из сельской местности в город, а также преобразованием сельских населенных пунктов в городские.

Основные массы туристов устремляются чаще всего в города – большие и малые, разнотипные. Поэтому большую важность имеет наличие развитой транспортной инфраструктуры в регионе при организации туристских поездок.

Стоит отметить, что сельская местность и города развитого типа являются не только местами обитания населения, но и источником трудовых ресурсов, в том числе и для туристского бизнеса, включая всю его сложную инфраструктуру. Таким образом, можно предположить, что процесс урбанизации является одной из самых важных составных частей социально-экономического развития.

В настоящее время основной целью социально-экономического развития большинства стран мира и их регионов является улучшение качества жизни населения. Индустрия транспорта является весьма эффективной и высокодоходной отраслью. На ее долю приходится около 12% мирового валового продукта. Транспорт дает каждое десятое рабочее место, на его долю приходится около 11% капиталовложений. Интеграция нашей страны в мировую экономическую систему обеспечивает свободный доступ на рынок иностранных конкурентов, приводит отечественных производителей к необходимости завоевывать свое место на мировом рынке, что требует не только разнообразных знаний и профессионализма в транспортной деятельности, но и умения пользоваться новыми прогрессивными методами управления этой отраслью [1].



В настоящее время Россия не является исключением. Концепция долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 г. ставит перед собой цель – неуклонный рост благосостояния граждан России, снижение уровня межрегиональной дифференциации в социально-экономических условиях регионов и качества жизни.

Для России региональный фактор имеет большое значение, так как страна имеет внушительный масштаб. Из-за огромных различий в природно-географических, экономических и других условиях в регионах России процессы воспроизводства уникальны, их эффективность является необходимым условием для комплексного пропорционального развития экономики. Успешное развитие региона неотъемлемо связано с ростом популярности туристского региона, повышение привлекательности транспортных ресурсов и уровня качества регионального турпродукта превращают туристскую инфраструктуру региона в весьма

привлекательный объект для инвестирования. Рост инвестиций (в том числе и иностранных) в региональную туристскую индустрию посредством создания благоприятных условий для развития туризма ведет не только к повышению рентабельности и уровня качества производимых туристских услуг, но и к популяризации туристского региона, как в самом субъекте, так и за его пределами.

Урбанизация как фактор развития транспорта состоит в том, что не находя удовлетворения в работе, современный человек имеет все меньше возможностей для полноценного отдыха. Большая часть населения в развитых странах проживает в городах. Многие исследователи и социологи отмечают, что городской стиль жизни отличают стрессовые ситуации, ускоренный ритм жизни, отсутствие контактов с людьми. Поэтому именно туризм является для многих людей возможностью отвлечься от напряженной жизни в городе и временно вернуться к природе в поисках душевного равновесия и контактов с людьми.

### Цель исследования

Туризм выступает явлением, которое способствует развитию урбанизационных процессов, как в городах, так и в сельских районах. Понятие туристической урбанизации, с одной стороны, определяет процесс развития городов с доминирующей туристической функцией, а с другой – все изменения, происходящие в сельских территориях под влиянием туристического обустройства и туристического движения [2].

Осуществляемый туристами трансфер капитала из городов в сельскую местность вызывает много изменений и в пределах села, на сельскохозяйственных и лесных территориях.

В настоящее время становится очевидным, что применение в управлении туристической инфраструктурой опыта менеджмента становится не просто желательным, но жизненно необходимым.

Мировое сообщество признает значение туризма как общественно и экономически важного явления. Многие страны способствуют развитию туризма на своих территориях и продвигают идеи и принципы туризма на мировой арене. Транспортная инфраструктура туризма является составной частью туристской и транспортной инфраструктуры [3].

Особую роль в развитии и управлении транспортной инфраструктурой играет государство, которое изначально во всех странах являлось собственником основных транспортных ресурсов, государство остается основным инвестором в транспортную инфраструктуру и отвечает за стратегическое развитие транспортной отрасли как основы безопасности и целостности государства.



### Методы исследования

Так как регионы России имеют большие различия практически по всем социально-экономическим показателям развития, можно предположить, что и характеристикам городской системы территорий также свойственно разнообразие. Заметные различия в размере и составе городской системы субъектов Российской Федерации создают эмпирическую основу для оценок влияния урбанизации и структуры городской системы на развитие страны и для выявления экономического ресурса урбанизации. Представление о межрегиональных различиях городской системы России позволяет получить данные, приведенные в таблице. Из выборки исключено два субъекта РФ: Москва и Санкт-Петербург, так как, во-первых, их включение искусственно добавляет лишнюю вариацию, во-вторых, в данном случае структурные характеристики урбанизации зафиксированы, и это будет вносить искажение в описание динамики. Доля городского населения определяет масштаб городской системы. Она менялась в регионах России: в 2005 г. – от 42 до 92%, а в 2016 г. – от 39 до 96%. Средний размер города, который характеризует степень использова-

ния агломерационного потенциала и эффекта масштаба в регионе, варьировался в 2005 г. от 7 до 228 тыс. чел., в 2016 г. – от 8 до 226 тыс. чел.

Доля городских жителей, проживающих в самом большом городе региона, является оценкой уровня концентрации городского населения, размах вариации этого показателя составляет около 90% и меняется незначительно в рассматриваемом периоде. Разница в отношении размеров самого большого и самого малого города в регионе достигала 220 раз в 2005 г. и снизилась до 200 раз в 2016 г. Внутрирегиональное разнообразие городской системы, оцениваемое с помощью коэффициента вариации размера городов, также сильно различается. Коэффициент вариации принимает значения от 0,5 до 2,8% и не меняется со временем, т. е. степень неоднородности городской системы территорий устойчиво различается более чем в 5 раз. Из сопоставления средних значений, размаха вариации и коэффициента вариации можно сделать заключение, что минимальные и максимальные значения не являются отдельными выбросами в рассматриваемых распределениях.

#### *Пространственные различия в городской системе России* *Spatial differences in the Russian urban system*

Показатель	Минимальное значение		Максимальное значение		Среднее значение		Коэффициент вариации	
	2005	2016	2005	2016	2005	2016	2005	2016
Доля городского населения в регионе, %	41,5	39,2	92,1	95,7	69,3	69,9	16,5	16,1
Средний размер города в регионе, тыс. чел.	7,4	7,9	227,8	226,2	78,2	78,1	50,0	50,7
Доля городского населения, проживающего в самом крупном городе региона, %	4,0	4,2	93,1	94,8	54,6	56,0	33,4	32,6
Отношение численности населения самого большого к самому малому городу региона	2,2	2,8	484,8	564,1	80,0	85,3	115,8	118,2
Коэффициент вариации размера городов региона	0,5	0,5	2,8	2,8	1,6	1,6	–	–



Приведенные оценки свидетельствуют, что регионы России сильно различаются по размерам и составу городов, причем тенденции к конвергенции со временем не наблюдается. Устойчивость разрывов в социально-экономическом развитии территорий России и стабильность межрегиональных различий в структуре городской системы могут быть связаны.

Туризм как социально-значимая категория способствует повышению уровня качества жизни населения и развития региона в целом.

Опыт зарубежных стран показывает, что основной направляющей силой в управлении транспортной инфраструктурой туризма является государство, которое активно использует формы сотрудничества на разных уровнях бюджета, и государственно-частное партнерство.

Поддерживающие функции принадлежат различным некоммерческим организациям. Чтобы убедить туристов и обычных граждан пользоваться общественным транспортом, необходимо сделать его комфортным, современным, доступным, а в ряде случаев и бесплатным, это позволит повысить производительность труда и оборачиваемость капитала в транспортной инфраструктуре региона, что приведет к значительному росту объема перевозок в целях развития туризма и повышения благосостояния населения региона.

В 2016 г. мировым лидером в секторе путешествий и туризма стала Испания, за ней последовали Германия, Франция, Соединенные Штаты Америки, Великобритания, Австралия, Италия, Япония, Канада и Сингапур. Все вместе они составили десятку лидеров рейтинга конкурентоспособности путешествий и туризма 2016 г. Россия в 2016 г. заняла 45 строчку в рейтинге, поднявшись на 18 позиций по сравнению с 2014 г. [3].

Индекс конкурентоспособности сектора путешествий и туризма составляется каждые два года и охватывает 141 страну. Так в конце 2018 г. будут опубликованы обновленные данные индекса конкурентоспособности [3].

В Российской Федерации уделяется большое внимание развитию интеллектуальных транспортных систем (ИТС), при этом сама сфера применения понятия ИТС очень широка и включает применение информационных технологий на пассажирском транспорте. В нашей стране уже накоплен определенный успешный опыт предоставления информационных услуг и применения электронных платежей в сфере междугородных автобусных перевозок.

Информационным ресурсом, содержащим расписания междугородных автобусных маршрутов, на большей части территории Российской Федерации является сайт [4]. Ресурс предоставляет подробную информацию о прямых и проходящих рейсах. Отметим, что система имеет недостатки, например, данные о рейсах в Иркутской области в этом ресурсе отсутствуют.

В настоящее время имеются примеры создания автовокзалами собственных Интернет-сайтов, предоставляющих информацию не только о постоянно действующих расписаниях и вносимых в них изменениях, но также услуги по бронированию и покупке билетов в on-line режиме. Примерами этого является официальный сайт Санкт-Петербургского Автобусного Вокзала [4] и сайт «Автовокзала Северный» г. Екатеринбурга.

Поскольку удаленное (или дистанционное) обслуживание пассажиров междугородных автобусных маршрутов организовано в целом ряде регионов РФ, создан единый для Российской Федерации – Интернет-сервис по продаже билетов на междугородные рейсы [5]. В качестве примера организации предоставления информации о междугородных автобусных рейсах в общероссийский ресурс и организации продажи билетов на нем можно рассматривать следующие области с развитыми системами междугородных автобусных маршрутов: Владимирская, Новгородская, Рязанская и т.д.

Предоставление только частичной информации о маршрутах [6] и практически полное отсутствие on-line обслуживания в Интернет-ресурсах свидетельствуют о чрез-



вычайно низком уровне организации обслуживания междугородных автобусных перевозок во многих субъектах РФ.

Создание соответствующего сервиса Интернет-обслуживания в субъектах, еще не обеспеченных подобными сервисами, не несет техническую проблему. На россий-

ском рынке предоставляются услуги по созданию Интернет-сервисов удаленного обслуживания пассажиров, например, «Управление автовокзалами» [7]. Система «Управление автовокзалами» построена на базе программного продукта 1С-Битрикс «Управление сайтом» [8].

### Результаты исследования

Транспортная инфраструктура туризма характеризуется нелинейными процессами.

Нелинейность позволяет создавать и тестировать модели системы с реалистичными динамическими характеристиками и формировать модели разнообразных процессов.

Имитационное моделирование – это теория, описывающая структуру и внутренние взаимодействия в системе. В основу структуры модели могут быть положены принципы динамического поведения системы с обратной связью, или модель может представлять собой описание некоторых наблюдаемых фрагментов системы. Модель, описывая динамику процессов, способна изменять темпы и уровни для преобразования поведения системы во времени и в соответствии с задачами, для решения которых она была построена. Наиболее перспективным направлением для построения упрощенных описаний реальных процессов с целью изучения их поведения в различных возможных ситуациях является имитационное моделирование.

Ключевым моментом в управлении транспортной инфраструктурой туризма является обеспечение безопасности жизнедеятельности людей, в том числе туристов, безопасности дорожного движения и сохранения благоприятной экологической обстановки. Именно поэтому моделирование транспортной инфраструктуры туризма региона проводится для того, чтобы найти такое ее оптимальное состояние, которое бы соответствовало растущим транспортным и туристским потокам, предполагало бы альтернативные варианты развития транспортной системы, перераспределение транс-

портных потоков региона с целью снижения нагрузки на территорию, экологию и способы повышения удовлетворенности потребителей комплексом туристско-транспортных услуг, а также превращения транзитных пассажиров и туристов в дальнейшем – в туристов региона.

Эффективное управление развитием транспортной инфраструктуры региона решает следующие задачи:

- удовлетворение спроса на перевозки с целью туризма и отдыха;
- обеспечение безопасности, скорости и современного уровня комфорта в таких перевозках;
- обеспечение информационного обслуживания пассажиров и туристов;
- обеспечение надлежащего уровня предоставления услуг.

Основными направлениями развития транспортной инфраструктуры туризма являются:

- создание современных информационных систем регулирования и контроля движения; организация зон с ограниченными по видам автотранспорта, времени суток и дням режимами движения, въезда, выезда и паркования;
- создание в общественных и жилых зонах разветвленной сети пешеходных зон, улиц, площадей, маршрутов, обеспечивающих удобные изолированные от транспортных потоков пешеходные связи;
- развитие системы хранения и паркования автомобилей и системы автосервиса, в том числе увеличение емкости гаражей-стоянок и перехватывающих временных стоянок в узлах общественного транспорта.



Транспортная инфраструктура является средством развития туризма в регионе и региона в целом. Совершенствование транспортных услуг для туристских целей имеет ярко выраженную социально-экономическую направленность, так как способствует доступности социальных благ для населения, решает экономические задачи развития региона, повышает привлекательность региона, что способствует росту урбанизации<sup>4,5,6</sup> [9].

Очевидно, что преобладание тех или иных эффектов зависит от особенностей развития страны, от сети пространственных связей, ее плотности и от функций крупных городов. Эффективность механизмов управления также в какой-то мере определяется структурой городской системы, кон-

курентия небольшого числа городов облегчает координацию, но при этом сокращаются возможности пространственного маневра и гибкости. И, несмотря на присутствие некоторых универсальных свойств, сочетание выгод и издержек урбанизации и структуры городской системы в каждой стране имеет свою специфику.

Подводя итог рассуждениям, можно сформулировать следующие гипотезы:

1. Урбанизация и доминирование городской экономики положительно влияют на экономическое развитие территории.

2. Концентрированная городская структура, в которой городское население сосредоточено в одном центре, положительно влияет на экономическое развитие.

## Выводы

Урбанизация – интегральный и глобальный процесс, приводимый в действие множеством разнообразных факторов и имеющий свою выраженность в виде городов, особенно крупных и других более сложных форм городского расселения. Урбанизация охватила все страны мира.

В ходе урбанизации происходит последовательное и многостороннее усложнение городов как своеобразных социально-экономических организмов и градостроительных систем. Возрастает роль и значение больших городов, из их среды выделяются крупнейшие города, далее – города-миллионеры и многомиллионные города. При этом важно подчеркнуть качественный характер изменений. Города не просто увеличиваются в размерах, но приобретают более высокий уровень своей организации –

функциональной и планировочной; меняется их место в территориальной организации общества.

Движущими силами увеличения удельного веса горожан и уровня урбанизации в каждой стране, а также роста крупных городских агломераций и отдельных крупных городов являются социально-экономические, политические и демографические факторы. В частности, устойчивое увеличение уровня урбанизации в мировом масштабе отражает быстрый рост мировой экономики после второй мировой войны, расширение экономической активности населения, изменение размера семей, характера распределения доходов как внутри отдельных наций, так и регионов, а также увеличение масштабов государственного вмешательства.

<sup>4</sup>Ахунзянова Е.Ф. Повышение эффективности туристических услуг с учетом транспортной составляющей: на примере российских авиаперевозок: дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05. М., 2008. / Akhunzyanova E.F. Improving efficiency of tourism services taking into account the transport component: on example of Russian air transportation: Candidate's Dissertation in Economics: 08.00.05. M., 2008.

<sup>5</sup>Брагин Д.Ю. Управление взаимодействием туристских и транспортных предприятий: дис. канд. экон. наук: 08.00.05. СПб., 2002. 17 с. / Bragin D.Yu. Management of tourist and transport enterprises interaction: Candidate's Dissertation in Economics: 08.00.05. SPb., 2002. 17 p.

<sup>6</sup>Гечебаев М.Ю. Управление экономической системой туристского транспорта с использованием логистического подхода: дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05. М., 2010. 182 с. / Gechebaev M.Yu. Management of tourist transport economic system using a logistic approach: Candidate's Dissertation in Economics: 08.00.05. M., 2010.



По нынешним прогнозам, можно ожидать, что население городских районов мира возрастет к 2050 г. на 3,1 миллиарда человек, тогда как численность сельского населения достигнет максимальной величины в 3,5 миллиарда примерно в 2019 г., а затем начнет сокращаться. Практически целиком рост городского населения, как ожидается, будет приходиться на развивающиеся страны. Естественный прирост по-прежнему в значительной степени способствует росту городского населения, на его долю нередко приходится 60% такого роста или более [10–19].

По мере того как мир становится все в большей степени городским, принимаемые сегодня решения в городах всего мира будут определять экономическое, социальное и экологическое будущее человечества.

При надлежащем регулировании урбанизация может способствовать борьбе с нищетой, неравенством и ухудшением состояния окружающей среды, и меры по использованию открываемых ею возможностей и решению вытекающих из нее проблем должны носить оперативный и устойчивый характер.

Объективные процессы размещения населения и опыт науки и практики говорят о том, что перспективы расселения необходимо связать с дальнейшим развитием урбанизации и крупных урбанистических структур. Человечество обязательно ощутит на себе влияние процесса урбанизации, но то, каким оно станет – положительным или отрицательным, – во многом будет зависеть от принимаемых сегодня мер по планированию городов.

#### Библиографический список

1. Milova Y.Y., Piskovets E.L., Chernyshenko M.S. Challenges and Opportunities for Regional Tourism Development // Chernyshenko Advances in Economics, Business and Management Research. 2017. Vol. 38.
2. Coles N., Hall M.C. International business and tourism: global issues, contemporary interactions // Routledge Taylor & Frances Group, Лондон, 2008. 283 p.
3. Александрова А.Ю. Международный туризм. М.: Аспект Пресс, 2005. 470 с.
4. Расписание автобусов на автовокзалах [Электронный адрес]. URL: <http://www.avtovokzaly.ru> (дата обращения: 12.06.2018)
5. Мир автобусных билетов [Электронный адрес]. URL: <http://www.biletnaavto.ru/mva/mva.php> (дата обращения: 12.06.2018)
6. Общественно-политический портал [Электронный адрес]. URL: <http://obl-vesti.ru/avtobus.html> (дата обращения: 12.06.2018)
7. Автоматизация автовокзала [Электронный адрес]. URL: <http://www.unistation.ru> (дата обращения: 12.06.2018)
8. 1 С-Битрикс – система управления сайтом [Электронный адрес]. URL: <http://www.1c-bitrix.ru> (дата обращения: 12.06.2018)
9. Kuklina V., Ruposov V., Kuklina M., Rogov V., Bayaskalanova T. (2017) Multi-polar trajectories of tourism development within Russian Arctic, Proceedings of the International Conference on Trends of Technologies and Innovations in Economic and Social Studies 2017 (on 28-30th of June). Editors: Anna Yu. Karpov, Tomsk Polytechnic University, Russia, Nikita Martyushev, Tomsk Polytechnic University, Russia. Part of series: AEBMR, ISSN: 2352-5428. Vol. 38 (2017). P. 379–385.
10. Александрова А.Ю. Международный туризм. 2-е изд., перераб. и доп. М.: КноРус, 2010. 464 с.
11. Биржаков М.Б., Никифоров В.И. Индустрия туризма: перевозки. СПб.: Изд. Дом «Герда», 2007. 528 с.
12. Биржаков М.Б. Введение в туризм. 10-е изд. М.–СПб.: Изд. Дом «Герда», 2014. 544 с.
13. Боташева Б.С. Особенности санаторно-курортного комплекса на КМВ // Научный потенциал студенчества в XXI в.: материалы IV Междунар. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Т. 3. Экономика. Ставрополь, 2010. 592 с.
14. Бочаров Б.В., Мачкин Ю.Е. О некоторых факторах и особенностях развития внутреннего туризма в России // Труды Междунар. Туристской Академии: сб. науч. статей. М.: МТА, 2012. Вып. 7. 236 с.
15. Бутко И.И., Ситников В.А. Транспортное обслуживание туризма. М.: Ростов н/Д: МарТ, 2006. 335 с.
16. Всемирная туристская организация при ООН (ЮНВТО) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.russiatourism.ru/contents/deyatelnost/mezhdunarodnaya-deyatelnost/sotrudnichestvo-v-mezhdunarodnykh-organizatsiyakh/vsemirnaya-turistskaya-organizatsiya-pri-oon-yunvto/> (дата обращения: 12.06.2018)
17. Глазков В.Н. Организация сервиса и туристического обслуживания на железнодорожном транспорте. М.: Московский государственный университет путей сообщения, 2009. 171 с.
18. Ключников А.В. Менеджмент туризма. М.: Советский спорт, 2009. 228 с.
19. Бон Т.М. Минский феномен: городское планирование и урбанизация в Советском Союзе после Второй мировой войны / пер. с нем. М.: Российская политическая энциклопедия, 2017. 448 с.



### References

1. Milova Y.Y., Piskovets E.L., Chernyshenko M.S. Challenges and Opportunities for Regional Tourism Development. *Chernyshenko Advances in Economics, Business and Management Research*. 2017, vol. 38.
2. Coles N., Hall M.C. *International business and tourism: global issues, contemporary interactions*. Routledge Taylor & Frances Group, London, 2008, 283 p.
3. Aleksandrova A.Yu. *Mezhdunarodnyy turizm* [International tourism]. Moscow: Aspekt Press Publ., 2005, 470 p. (In Russian)
4. *Raspisanie avtobusov na avtovokzalah* [Coach schedules at bus stations]. Available at: <http://www.avtovokzaly.ru> (accessed 12 June 2018)
5. *Mir avtobusnyh biletov* [World of bus tickets]. Available at: <http://www.biletnaavto.ru/mva/mva.php> (accessed 12 June 2018)
6. *Obshchestvenno-politicheskij portal* [Social and political portal]. Available at: <http://obl-vesti.ru/avtobus.html> (accessed 12 June 2018)
7. *Avtomatizatsiya avtovokzala* [Bus station automation]. Available at: <http://www.unistation.ru> (accessed 12 June 2018)
8. *1 S-Bitriks – sistema upravleniya sajtom* [1 C-Bitrix site management system]. Available at: <http://www.1c-bitrix.ru> (accessed 12 June 2018)
9. Kuklina V., Ruposov V., Kuklina M., Rogov V., Bayaskalanova T. (2017) Multi-polar trajectories of tourism development within Russian Arctic, *Proceedings of the International Conference on Trends of Technologies and Innovations in Economic and Social Studies 2017* (on 28-30th of June). Editors: Anna Yu. Karpov, Tomsk Polytechnic University, Russia, Nikita Martyushev, Tomsk Polytechnic University, Russia. Part of series: AEBMR, ISSN: 2352-5428. 2017, vol. 38, pp. 379–385.
10. Aleksandrova A.Yu. *Mezhdunarodnyy turizm. 2-e izd., pererab. i dop.* [International tourism. 2<sup>nd</sup> edition, revised and enlarged]. Moscow: KnoRus Publ., 2010, 464 p. (In Russian)
11. Birzhakov M.B., Nikiforov V.I. *Industriya turizma: perevozki* [Tourism industry: transportation]. Saint-Petersburg: Gerda Publ., 2007, 528 p. (In Russian)
12. Birzhakov M.B. *Vvedenie v turizm* [Introduction to tourism]. Moscow–Saint-Petersburg: Gerda Publ., 2014, 544 p. (In Russian)
13. Botasheva B.S. *Osobennosti sanatorno-kurortnogo kompleksa na KMV* [Features of the Caucasian spa]. *Materialy IV Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenykh "Nauchnyy potencial studentchestva v XXI veke"* [Proceedings of the IV International scientific conference of students, postgraduates and young scientists: Students' scientific potential in XXI century:]. Stavropol', 2010, 592 p. (In Russian)
14. Bocharov B.V., Machkin Yu.E. *O nekotorykh faktorah i osobennostyah razvitiya vnutrennego turizma v Rossii* [On some factors and development features of domestic tourism in Russia]. *Trudy Mezhdunarodnoj Turistskoj Akademii. Sbornik nauchnykh statej* [Proceedings of the International Tourism Academy: collection of scientific articles]. Moscow: MTA Publ., 2012, Issue 7, 236 p. (In Russian)
15. Butko I.I., Sitnikov V.A. *Transportnoe obsluzhivanie turizma* [Tourism transport servicing]. Moscow: Rostov: MarT Publ., 2006, 335 p. (In Russian)
16. *Vsemirnaya turistskaya organizatsiya pri OON (YuN-VTO)* [The World Tourism Organization of the United Nations (UNWTO)]. Available at: <https://www.russiatourism.ru/contents/deyatelnost/mezhdunarodnaya-deyatelnost/sotrudnichestvo-v-mezhdunarodnykh-organizatsiyakh/vsemirnaya-turistskaya-organizatsiya-pri-oon-yunvto/> (accessed 12 June 2018)
17. Glazkov V.N. *Organizatsiya servisa i turisticheskogo obsluzhivaniya na zhelezodorozhnom transporte* [Organization of services and tourist services on railway transport]. Moscow: Moscow State University of Railway Engineering Publ., 2009, 171 p. (In Russian)
18. Klyuchnikov A.V. *Menedzhment turizma* [Tourism management]. Moscow: Sovetskij sport Publ., 2009, 228 p. (In Russian)
19. Bon T.M. Minsk phenomenon: urban planning and urbanization in the Soviet Union after world war II, 2017. 448 p. (Russ. ed.: *Minskij fenomen: gorodskoe planirovanie i urbanizatsiya v Sovetskom Soyuze posle Vtoroj mirovoj vojny*. Moscow, Russian political encyclopedia Publ., 2017, 448 p.). (In Russian)

#### Критерии авторства

Михайлов А.Ю., Попова Е.Л., Гайворонский И.Л. совместно подготовили рукопись и несут ответственность за плагиат.

#### Authorship criteria

Mikhailov A.Yu., Popova E.L., Gaivoronskiy I.L. have prepared the manuscript for publication and bear the responsibility for plagiarism.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.



Оригинальная статья / Original article

УДК 629.3.027

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-10-212-226>

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ОБЪЕМА И ДЕМПФИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА НА СВОБОДНЫЕ ЗАТУХАЮЩИЕ КОЛЕБАНИЯ ДИАФРАГМЕННЫХ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ РЕССОР

© В.В. Новиков<sup>1</sup>, А.В. Поздеев<sup>2</sup>, Д.А. Чумаков<sup>3</sup>

Волгоградский государственный технический университет,  
400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр-т им. Ленина, 28.

**РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ.** Экспериментальное определение влияния демпфирующего устройства и различного сочетания переменного и постоянного объема воздуха в диафрагменной пневматической подвеске на эффективность гашения свободных затухающих колебаний подрессоренной массы при импульсном кинематическом возмущении. **МЕТОДЫ.** Возбуждение свободных затухающих колебаний подрессоренной массы на пневмоподвеске осуществлялось на динамическом стенде с помощью гидропульсатора методом толчка поршня пневморессоры на 50 и 100 мм вверх или вниз. При этом колебания подрессоренной массы регистрировались во времени с помощью магнитострикционного датчика перемещения GEFRAN МК 4, данные с которого поступали на пульт управления. Методика испытаний предусматривала запись осциллограмм свободных затухающих колебаний подрессоренного груза, массой 500 кг, установленного на пневматической рессоре с резинокордной оболочкой рукавного типа, структура которой зависела от разного сочетания величин постоянного и переменного объемов поршня пневморессоры и установки демпфирующих устройств между ними. Испытания проводились при следующих рабочих объемах поршня пневморессоры: 11; 18,6; 31 и 38,6 л, где 11 л – переменный объем над поршнем; 18,6 л – суммарный объем резинокордной оболочки (11 л) и полого поршня (7,6 л); 31 л – суммарный объем резинокордной оболочки (11 л) и ресивера (20 л); 38,6 л – суммарный объем резинокордной оболочки (11 л), полого поршня (7,6 л) и ресивера (20 л). При объемах 11 и 31 л сообщение с полостью поршня перекрывалось заглушкой, а при объемах 18,6 и 38,6 л сообщение с резинокордной оболочкой с полостью поршня было либо свободным, либо через демпфирующий узел, представляющий собой дроссельное отверстие диаметром 6 мм и обратный клапан, открытый на ходе сжатия поршня пневморессоры. При объеме 31 и 38,6 л к верхней крышке поршня пневморессоры подсоединялся ресивер посредством шланга длиной 1 м и сечением 20 мм. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Проведен анализ влияния воздушного демпфирования и различных сочетаний переменного и постоянного объема пневматической рессоры на ее демпфирующие свойства, результаты представлены в виде осциллограмм свободных затухающих колебаний. **ВЫВОДЫ.** По сравнению с поршнем пневморессоры без постоянного дополнительного объема увеличение рабочего объема с 11 до 18,6 л за счет подсоединения полости поршня, на котором установлены дроссель с обратным клапаном, обеспечивает снижение собственной частоты колебаний в среднем с 1,75 до 1,25 Гц и уменьшение амплитуды первого колебания на 23 %. Подсоединение к переменному объему поршня пневморессоры ресивера, объемом в 20 л, приводит к снижению амплитуды первого колебания свободных затухающих колебаний подрессоренной массы на 50 % и времени затухания колебаний в среднем с 1,7 до 1 с.

**Ключевые слова:** пневматическая рессора, свободные затухающие колебания, гидропульсатор, резинокордная оболочка, воздушный демпфер, рабочий объем.

**Информация о статье.** Дата поступления 02 августа 2018 г.; дата принятия к печати 19 сентября 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 октября 2018 г.

<sup>1</sup>Новиков Вячеслав Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры автоматических установок, e-mail: [nvv\\_60@mail.ru](mailto:nvv_60@mail.ru)

Vyacheslav V. Novikov, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Automatic Installations, e-mail: [nvv\\_60@mail.ru](mailto:nvv_60@mail.ru)

<sup>2</sup>Поздеев Алексей Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматических установок, e-mail: [pozdeev.vstu@gmail.com](mailto:pozdeev.vstu@gmail.com)

Aleksei V. Pozdeev, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Automatic Installations, e-mail: [pozdeev.vstu@gmail.com](mailto:pozdeev.vstu@gmail.com)

<sup>3</sup>Чумаков Дмитрий Андреевич, аспирант, e-mail: [chda1991@yandex.ru](mailto:chda1991@yandex.ru)

Dmitry A. Chumakov, Postgraduate student, e-mail: [chda1991@yandex.ru](mailto:chda1991@yandex.ru)



**Формат цитирования.** Новиков В.В., Поздеев А.В., Чумаков Д.А. Экспериментальное исследование влияния дополнительного объема и демпфирующего устройства на свободные затухающие колебания диафрагменных пневматических рессор // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 10. С. 212–226. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-212-226

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF SOME ADDITIONAL VOLUME AND A DAMPERING DEVICE ON FREE DAMPED OSCILLATIONS OF DIAPHRAGM AIR SPRINGS

V.V. Novikov, A.V. Pozdeev, D.A. Chumakov

Volgograd State Technical University  
28, Lenin pr., Volgograd, 400005, Russian Federation

**ABSTRACT.** The **PURPOSE** of the paper is to determine experimentally the influence of the damping device and various combinations of variable and constant air volumes in the diaphragm pneumatic suspension on damping efficiency of free decay oscillations of the sprung weight at a pulsed kinematic disturbance. **METHODS.** The excitation of free damped oscillations of the sprung weight on the air suspension was carried out on a dynamic test bench by means of a hydropulsator by the method of piston push of the air spring upwards or downwards by 50 and 100 mm. Magnetostrictive displacement transducer GEFTRAN MK 4 registered the oscillations of the sprung weight in time and sent the data to the control panel. The test method provided for the recording of the oscillograms of the free damped oscillations of 500 kg sprung weight mounted on the air spring with a sleeve-type rubber-cord shell, the structure of which depended on different combinations of the values of the constant and variable volumes of the air spring and installation of damping devices between them. The tests were carried out at the following displacement volumes of the air spring piston: 11; 18.6; 31 and 38.6 litres, where 11 litres is a variable volume above the piston; 18.6 litres – the total volume of the rubber-cord shell (11 litres) and the hollow piston (7.6 litres); 31 litres – the total volume of the rubber-cord shell (11 litres) and the receiver (20 litres); 38.6 litres – the total volume of the rubber-cord shell (11 litres), the hollow piston (7.6 litres) and the receiver (20 litres). When the volumes equaled 11 and 31 litres connection with the piston cavity was blocked by a plug. When the volumes were 18.6 and 38.6 litres the connection of the rubber-cord shell with the piston cavity was either free, or through a damping unit represented by a 6 mm diameter throttle and a reverse pressure valve opened during the compression strike of the air spring piston. When the volumes equaled 31 and 38.6 litres the receiver was connected to the top cover of the air spring by piston by a 1 m-long hose with the section of 20 mm. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The analysis is given to the effect of air damping and various combinations of variable and constant volumes of the air spring on its damping properties. The results are presented in the form of oscillograms of free damped oscillations. **CONCLUSIONS.** As compared with the air spring without a constant additional volume, increase in the displacement volume from 11 to 18.6 litres due to connecting the piston cavity with the throttle and reverse pressure valve installed on the piston decreases the natural frequency of oscillations on average from 1.75 to 1.25 Hz and reduces the amplitude of the first oscillation by 23%. A receiver with the volume of 20 litres connected to a variable volume of the air spring decreases the amplitude of the first oscillation of free damped oscillations of the sprung weight by 50% and reduces the oscillation damping time on average from 1.7 to 1s.

**Keywords:** air spring, free damped (decay) oscillations, hydropulsator, rubber-cord shell, air damper, displacement volume

**Information about the article.** Received August 02, 2018; accepted for publication September 19, 2018; available online October 31, 2018.

**For citation.** Novikov V.V., Pozdeev A.V., Chumakov D.A. Experimental investigation of the effect of some additional volume and a dampering device on free damped oscillations of diaphragm air springs. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 10, pp. 212–226. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-212-226. (In Russian)

### Введение

Повышением виброзащитных свойств подвески колес автотранспортных средств за счет применения воздушного демпфирования и изменения внутренней структуры пневматических рессор (ПР) занимаются многие исследователи, в том

числе ученые Волгоградской, Омской и других научных школ [1–27].

В работах [1, 2, 8, 17] приводятся результаты стендовых испытаний и теоретических исследований пневмоподвески с различным соотношением переменного и по-



стоянного объемов пневматических рессор, сообщенных между собой через воздушный демпфер (ВД). Из анализа полученных амплитудно-частотных характеристик следует, что применение удлиненного в два раза поршня (вместо стандартного) позволяет снизить амплитуду резонансных колебаний подвески на 23%, а подсоединение к ПР ресивера на 30 л приводит к уменьшению амплитуды вынужденных колебаний подвески более чем в 3 раза и снижению резонансной частоты с 1,1 до 0,5 Гц. Однако эти исследования были проведены только в низкочастотном диапазоне до 6 Гц и неясно, как изменятся виброзащитные свойства подвески на более высоких частотах, особенно в зоне резонанса колес. Также представляет интерес для изучения вопрос о влиянии рабочего объема пневматических рессор и воздушного демпфирования на амплитуду и общее время затухания колебаний подрессоренной массы при задании импульсного воздействия на поршень пневматических

рессор вверх или вниз.

В работах Г.С. Аверьянова, Б.А. Калашникова, Р.Н. Хамитова, А.С. Дьякова, Е.В. Климентьева повышение виброзащитных свойств серийной пневматической рессоры достигается изменением внутренней структуры, в том числе за счет применения внешних элементов питания и управления [4–6, 9, 12, 13, 18, 19, 21, 22, 24]. Однако этот подход требует очень быстрого соединения и разъединения переменного и постоянного рабочих объемов, например, при смене направления деформации пневматических рессор, с почти мгновенным выравниванием давлений в них, что достаточно трудно реализуемо на практике.

Поэтому поиск новых более простых технических решений пневматического подрессоривания, обеспечивающих эффективную виброзащиту автотранспортных средств в широком диапазоне частот, и их экспериментальное исследование являются актуальной задачей.

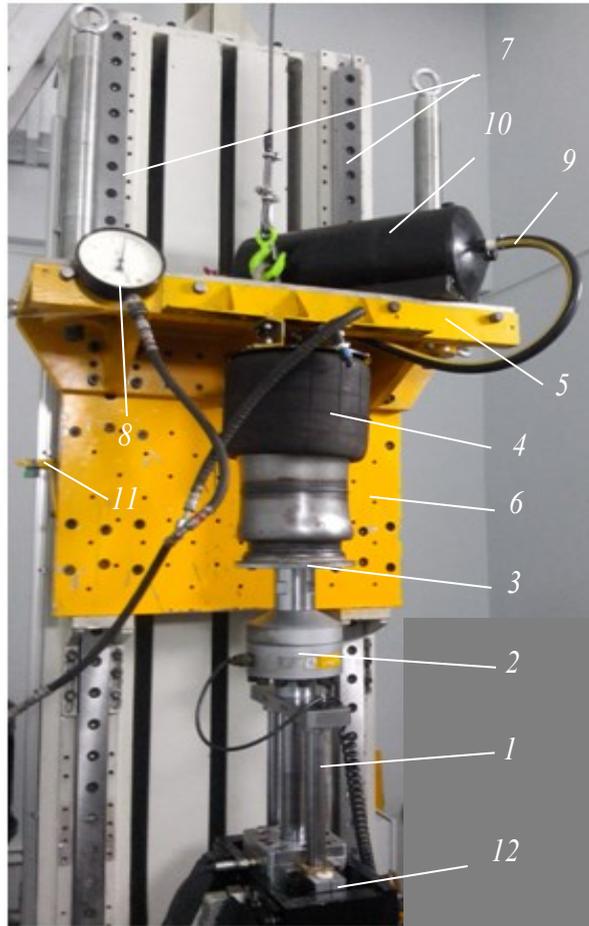
### Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка для испытания пневматических рессор (ПР) с различным рабочим объемом и воздушной демпфирующей системой была собрана на базе динамического стенда с сервогидравлическим приводом индийской фирмы *Biss ITW*, который установлен на кафедре «Автоматические установки» Волгоградского государственного технического университета.

Экспериментальная установка содержит гидропульсатор 1, на верхнем торце его штока закреплен силовой тензометрический датчик 2 с опорной тарелкой 3, на которую установлен поршень испытываемой ПР 4. Верхняя крышка ПР крепится на траверсе 5, соединенной с подрессоренной массой (ПМ) 6, установленной подвижно относительно вертикальных направляющих 7 стенда. Манометр 8 используется для контроля давления в ПР. Для увеличения рабочего объема ПР к ее верхней крышке через шланг 9 может быть подсоединен ресивер 10, который

устанавливается на траверсе 5. Для определения амплитуды перемещений ПМ 6 применяется 11 датчик перемещения и скорости *GEFRAN MK4*, а для регистрации положения штока гидропульсатора – датчик 12 положения *AC LVDT* (рис. 1).

Испытуемая ПР представляет собой резинокордную оболочку 1 (РКО) рукавного типа марки ВЛ 260-340, соединенную с верхней крышкой 2 и удлиненным полым профильным поршнем 3. На верхней части поршня имеется осевое отверстие, которое в зависимости от режимов испытаний остается либо открытым, либо закрывается заглушкой, либо в нем устанавливается демпфирующий узел 4, сообщающий надпоршневою полость 5 и поршневою полость 6 между собой. Демпфирующий узел 4 выполнен в виде дросселя 7 и обратного клапана 8, открытого на ходе сжатия. В верхней крышке имеется заправочный штуцер 9 и патрубок 10, который либо перекрывается, либо соединяется с ресивером (рис. 2).



**Рис. 1. Экспериментальная установка для стендовых испытаний пневморессоры:**  
1 – гидропульсатор; 2 – датчик силы; 3 – опорная тарелка гидропульсатора; 4 – пневматическая рессора; 5 – траверса; 6 – подрессоренная масса; 7 – вертикальные направляющие стенда; 8 – манометр; 9 – шланг; 10 – ресивер; 11 – датчик перемещения и скорости; 12 – датчик положения

**Fig. 1. Experimental installation for air spring bench tests:** 1 – hydro-pulsator; 2 – force sensor; 3 – supporting plate of the hydro-pulsator; 4 – air spring; 5 – main slide; 6 – sprung weight; 7 – vertical ways of the test bench; 8 – manometer; 9 – hose; 10 – receiver; 11 – displacement and rate sensor; 12 – position sensor

Объем ПР над поршнем в статическом положении  $V_{ст} = 11$  л, объем удлиненного полого поршня  $V_{п} = 7,6$  л. Высота ПР в статическом положении (от верхней крышки РКО до нижней крышки поршня)  $H_{ст} = 450$

мм. При подрессоренной массе  $m = 500$  кг статическое давление в ПР  $p_{ст} = 1,3$  кг/см<sup>2</sup> (0,13 МПа). Диаметр дросселя  $d = 6$  мм. Длина шланга  $l = 1$  м, а его сечение  $d_{ш} = 20$  мм. Объем ресивера  $V_{р} = 20$  л.

### Методика проведения экспериментальных испытаний ПР

Перед началом испытаний обеспечивается соответствующая подготовка ПР для обеспечения необходимого рабочего объема путем перекрытия или открытия осевого отверстия в поршне и патрубка в верхней крышке. При исследовании воздушного демпфирования в поршне устанавливается демпфирующий узел.

Потом ПР выставляется в статическое положение, соответствующее ее высоте 450 мм, путем подачи в нее воздуха от внешнего компрессора. При этом рабочее давление внутри ПР контролируется по манометру.

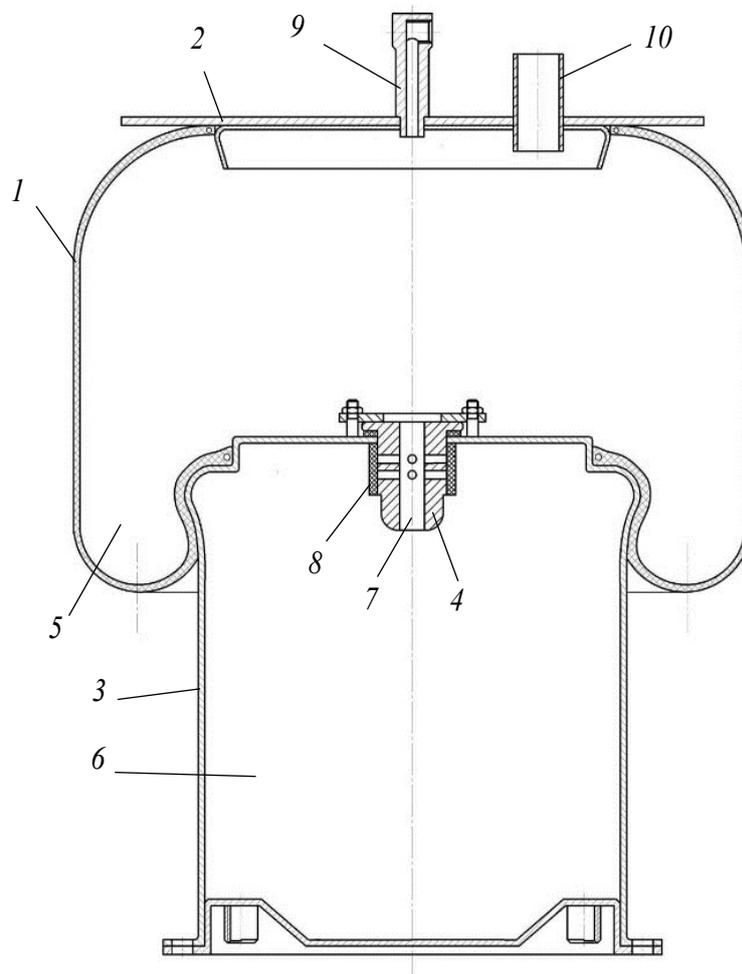
Далее с пульта управления стенда задается единичное перемещение штока гидропульсатора на 50 и 100 мм либо вверх



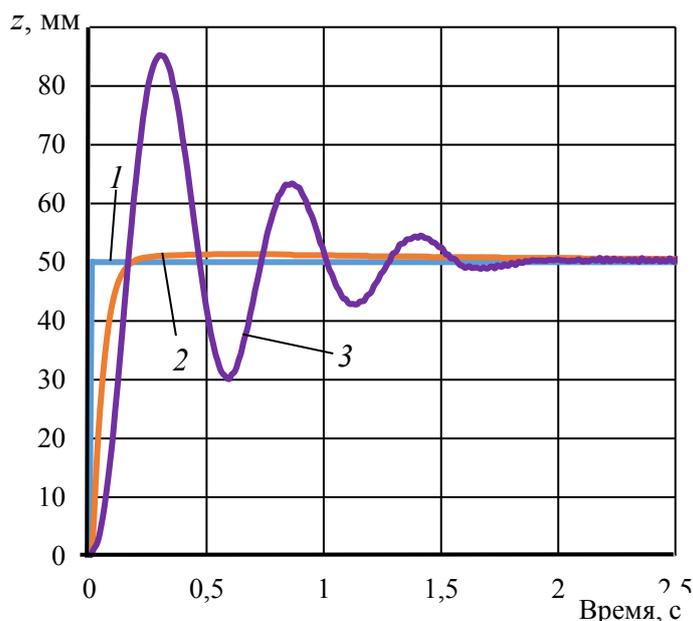
при имитации наезда на препятствие, либо вниз при имитации провала в яму. При этом перемещение штока гидропульсатора на 50 мм обеспечивается со скоростью 0,3 м/с за время 0,16 с, а перемещение на 100 мм – со скоростью 0,52 м/с за время 0,19 с.

В процессе испытаний ПР имела следующие рабочие объемы: 11; 18,6; 31 и 38,6 л. При объеме 11 и 31 л сообщение с полостью поршня перекрывалось заглушкой. При объеме 18,6 и 38,6 л сообщение с полостью поршня объемом 7,6 л было либо свободным, либо через демпфирующий узел. Также при объеме 31 и 38,6 л к верхней крышке ПР подсоединялся ресивер объемом 20 л.

Пример осциллограммы свободных затухающих колебаний подрессоренной массы при толчке поршня ПР вверх на 50 мм показан на рис. 3. Кривая 1 соответствует управляющему сигналу компьютерной программы стенда, кривая 2 – обработке этого сигнала штоком гидропульсатора, а кривая 3 – процесс затухающих колебаний подрессоренной массы. Как видно из этих графиков, процесс обработки сигнала происходит за время менее 0,2 с, а общий процесс затухающих колебаний заканчивается около 2 с. Поэтому для разных вариантов испытаний время регистрации колебаний задавалось 10 с.



**Рис. 2. Пневматическая рессора: 1 – резинокордная оболочка; 2 – верхняя крышка; 3 – полый поршень; 4 – демпфирующий узел; 5 – надпоршневая полость; 6 – поршневая полость; 7 – дроссель; 8 – обратный клапан; 9 – заправочный штуцер; 10 – патрубок**  
**Fig. 2. Air spring: 1 – rubber-cord shell; 2 – top cover; 3 – hollow piston; 4 – damping node; 5 – above-piston cavity; 6 – piston cavity; 7 – throttle; 8 – back-pressure valve; 9 – filling nozzle; 10 – junction pipe**



**Рис. 3. Осциллограммы свободных затухающих колебаний подрессоренной массы на пневморессоре после толчка вверх на 50 мм при рабочем объеме  $V_{cm} = 11$  л: 1 – управляющий сигнал; 2 – перемещение штока гидропульсатора; 3 – перемещение подрессоренной массы**

**Fig. 3. Oscillograms of free damped oscillations of the sprung weight on the air spring after the push upwards by 50 mm with the displacement volume  $V_{st} = 11$  litres: 1 – control signal; 2 – displacement of the hydropulsator rod; 3 – displacement of the sprung weight**

### Результаты экспериментальных испытаний

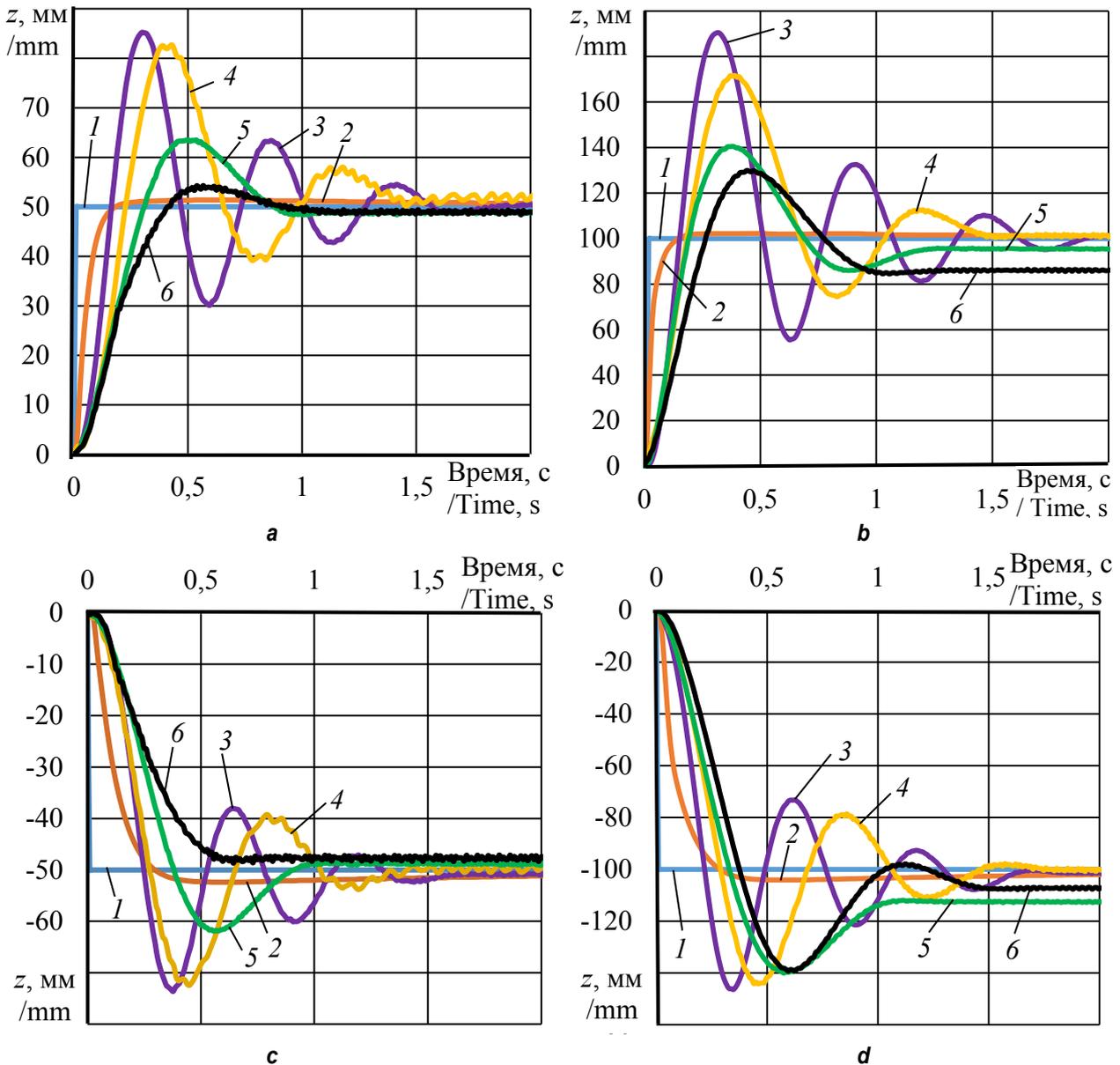
Ниже приведены результаты испытаний ПР с разными рабочими объемами, графики которых для удобства сравнения сгруппированы по величине и направлению перемещения поршня ПР при отсутствии и установке воздушного демпфера в поршне.

На рис. 4 представлены осциллограммы свободных затухающих колебаний (СЗК) подрессоренной массы на ПР при разных рабочих объемах и отсутствии в поршне воздушного демпфера, полученные после толчка поршня ПР вверх или вниз на 50 и 100 мм.

Из рис. 4 а видно, что после толчка поршня ПР вверх на 50 мм увеличение рабочего объема с 11 л (кривая 3) до 18,6 л (кривая 4) уменьшает время затухания колебаний с 1,7 до 1,49 с, снижает собственную частоту колебаний с 1,75 до 1,35 Гц. Это соответствует повышению относительного коэффициента затухания с 0,3 до 0,35. Увеличение рабочего объема ПР до 31 л (кривая 5) и 38,6 л (кривая 6) уменьшает время затухания колебаний до 1,0 с, но при большем

рабочем объеме характер свободных затухающих колебаний приближается к апериодическому закону. Кроме того, при увеличении объема ПР с 11 л (кривая 3) до 38,6 л (кривая 6) амплитуда первого полупериода колебания уменьшается относительно среднего положения с 34,2 до 3,75 мм.

Из рис. 4 б видно, что после толчка поршня ПР вверх на 100 мм увеличение рабочего объема с 11 л (кривая 3) до 18,6 л (кривая 4) уменьшает время затухания колебаний с 1,92 до 1,5 с, снижает собственную частоту колебаний ПР с 1,67 до 1,25 Гц. Это соответствует повышению относительного коэффициента затухания с 0,36 до 0,42. Увеличение рабочего объема ПР до 31 л (кривая 5) и 38,6 л (кривая 6) уменьшает время затухания до 1,23 и 1,0 с, соответственно. При этом характер свободных затухающих колебаний приближается к апериодическому закону. Кроме того, при увеличении объема ПР с 11 л (кривая 3) до 38,6 л (кривая 6) амплитуда первого полупериода колебания снижается с 88 до 29 мм.



**Рис. 4.** Осциллограммы свободных затухающих колебаний подрессоренной массы на пневморессоре при разных рабочих объемах и отсутствии в поршне воздушного демпфера: а и b – после толчка вверх на 50 и 100 мм; с и d – после толчка вниз на 50 и 100 мм; 1 – управляющий сигнал; 2 – перемещение штока гидропульсатора; 3, 4, 5, 6 – перемещения подрессоренной массы при  $V_{cm} = 11, 18,6, 31$  и  $38,6$  л

**Fig. 4.** Oscillograms of free damped oscillations of the sprung weight on the air spring at different displacement volumes and the air damper absent in the piston: a and b – after the push upwards by 50 and 100 mm; c and d – after the push downwards by 50 and 100 mm; 1 – control signal; 2 – displacement of the hydropulsator rod; 3, 4, 5, 6 – displacements of the sprung weight at  $V_{st} = 11, 18.6, 31$  and  $38.6$  litres

Из рис. 4 с видно, что после толчка поршня ПР вниз на 50 мм увеличение рабочего объема с 11 л (кривая 3) до 18,6 л (кривая 4) уменьшает время затухания колебаний с 1,6 до 1,42 с, снижает собственную частоту колебаний с 1,84 до 1,35 Гц. Это соответствует повышению относительного ко-

эффициента затухания с 0,19 до 0,3. Увеличение рабочего объема до 31 л (кривая 5) и 38,6 л (кривая 6) уменьшает время затухания до 0,9 и 0,64 с соответственно. При этом характер свободных затухающих колебаний приближается к аperiодическому закону. Увеличение рабочего объема с 11 л (кривая 3) до 38,6 л (кривая 6) снижает амплитуду



первого полупериода колебания с 23,6 до 0 мм.

Из рис. 4 *d* видно, что после толчка поршня ПР вниз на 100 мм при увеличении рабочего объема с 11 л (кривая 3) до 18,6 л (кривая 3) время затухания и амплитуда колебаний уменьшаются незначительно, а собственная частота колебаний снижается с 1,81 до 1,28 Гц. Это соответствует повышению относительного коэффициента затухания с 0,18 до 0,25. Увеличение рабочего объема ПР до 31 л (кривая 5) и 38,6 л (кривая 6) уменьшает время затухания колебаний до 1,1 и 1,5 с соответственно. При этом характер свободных затухающих колебаний приближается к апериодическому закону. Увеличение рабочего объема ПР с 11 л (кривая 3) до 38,6 л (кривая 6) на амплитуду колебаний влияет незначительно.

На рис. 5 представлены осциллограммы свободных затухающих колебаний подрессоренной массы на ПР без и с воздушным демпфером в поршне при разном рабочем объеме, полученные после толчка поршня ПР вверх или вниз на 50 и 100 мм.

Из рис. 5 *a* видно, что после толчка поршня ПР вверх на 50 мм увеличение рабочего объема с 18,6 л (кривая 3) до 38,6 л (кривая 4) уменьшает время затухания колебаний с 1,49 до 1,0 с. При этом наличие ВД в поршне ПР практически не влияет на время затухания колебаний подрессоренной массы, характер которых приближается к апериодическому закону, поскольку амплитуда первого колебания относительно средней линии уменьшается с 31,8 до 3,75 мм. При рабочем объеме 38,6 л (кривая 5) установка в поршень ПР дросселя с обратным клапаном дает незначительный эффект, так как основное демпфирование обеспечивается за счет дросселирования воздуха через шланг из переменного объема резинокордной оболочки в постоянный объем ресивера на ходе сжатия и обратно на ходе отбоя. Однако, при рабочем объеме 18,6 л (кривая 6) установка ВД в поршне снижает амплитуду первого полупериода колебания с 31,8 до 11,24 мм, то есть практически в 3 раза.

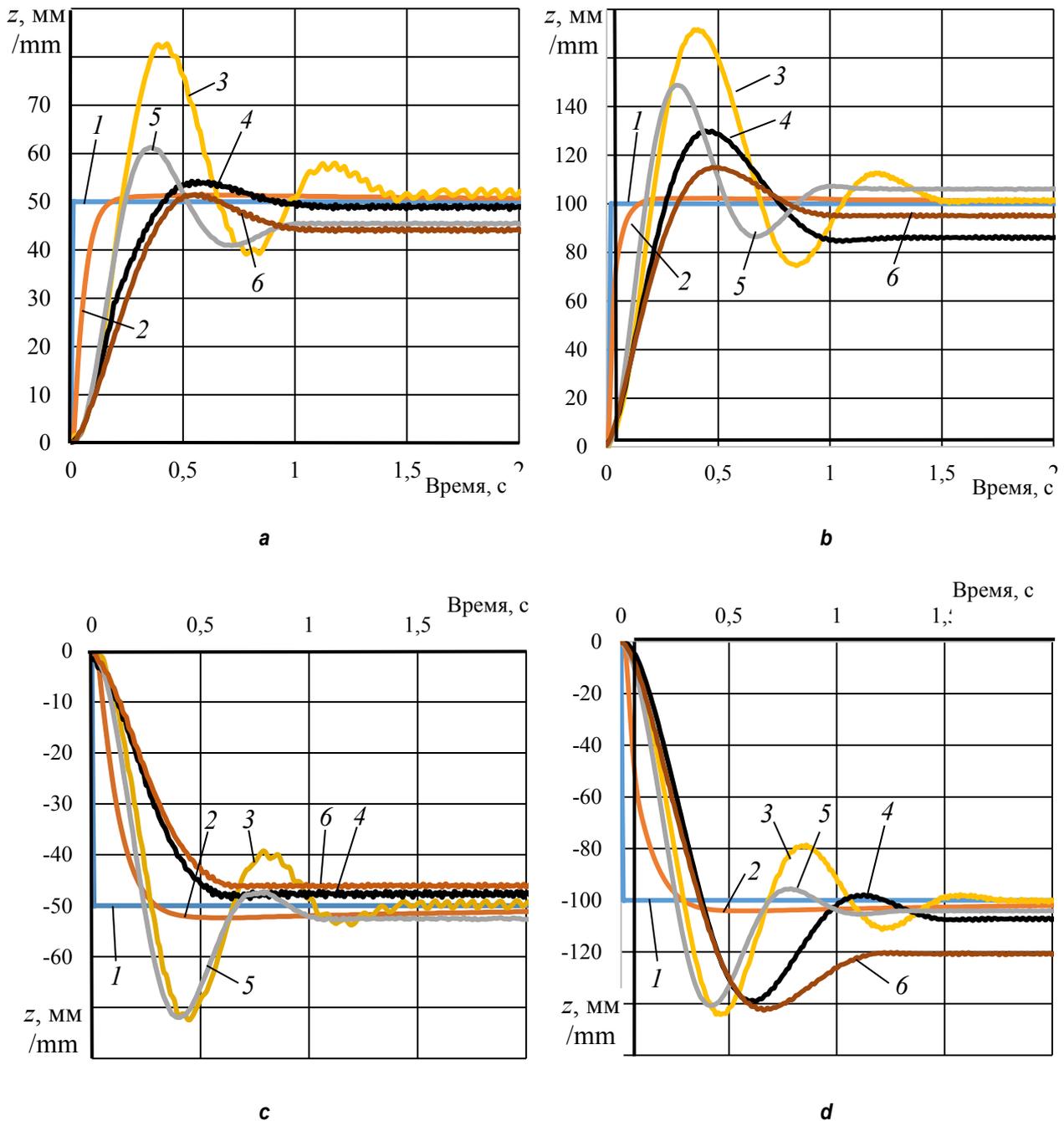
Из рис. 5 *b* видно, что после толчка

поршня ПР вверх на 100 мм увеличение рабочего объема с 18,6 л (кривая 3) до 38,6 л (кривая 4) уменьшает время затухания колебаний с 1,5 до 1,0 с, а амплитуда первого колебания относительно средней линии уменьшается с 70,8 до 29,3 мм. При этом наличие ВД в поршне ПР практически не влияет на время затухания колебаний подрессоренной массы. При рабочем объеме 38,6 л установка в поршень ПР дросселя с обратным клапаном обеспечивает больший эффект по сравнению с толчком вверх на 50 мм, снижая амплитуду первого колебания с 29,3 мм (кривая 4) до 16,6 мм (кривая 6). При рабочем объеме 18,6 л установка ВД в поршне снижает амплитуду первого полупериода колебания с 70,8 до 48 мм, то есть почти в 1,5 раза.

Из рис. 5 *c* видно, что после толчка поршня ПР вниз на 50 мм увеличение рабочего объема с 18,6 л (кривая 3) до 38,6 л (кривая 4) уменьшает время затухания колебаний с 1,42 до 0,64 с. Наличие демпфирующего узла в поршне ПР при рабочем объеме 18,6 л уменьшает время затухания до 1,08 с (кривая 5) и практически не влияет на время затухания колебаний подрессоренной массы при рабочем объеме 38,6 л. Установка ВД на поршне при рабочем объеме ПР 18,6 л (кривая 5) приводит к уменьшению амплитуды второго полупериода колебаний с 10 до 3 мм, а при рабочем объеме 38,6 л приводит к апериодическому закону затухания (кривая 6).

Из рис. 5 *d* видно, что после толчка поршня ПР вниз на 100 мм увеличение рабочего объема с 18,6 л (кривая 3) до 38,6 л (кривая 4) уменьшает время затухания колебаний с 1,78 до 1,5 с. При этом наличие ВД в поршне ПР при рабочих объемах 18,6 (кривая 5) и 38,6 л (кривая 6) уменьшает время затухания колебаний подрессоренной массы до 1,36 и 1,17 с и практически не влияет на уменьшение амплитуды колебаний.

В таблице показаны параметры колебаний (время затухания, собственная частота, амплитуда первого полупериода колебаний) при различных рабочих объемах ПР и наличии или отсутствии ВД, установленного в поршне.



**Рис. 5.** Осциллограммы свободных затухающих колебаний подрессоренной массы на пневморессоре при разных рабочих объемах и отсутствии или установке в поршне воздушного демпфера: а и б – после толчка вверх на 50 и 100 мм; с и d – после толчка вниз на 50 и 100 мм; 1 – управляющий сигнал; 2 – перемещение штока гидропульсатора; 3, 4 – перемещения ПМ при  $V_{cm.} = 18,6, 38,6$  без ВД; 5, 6 – перемещения ПМ при  $V_{cm.} = 18,6$  и  $38,6$  л с ВД

**Fig. 5.** Oscillograms of free damped oscillations of the sprung weight on the air spring at different displacement volumes and absent or installed air damper in the piston: a and b – after the push upwards by 50 and 100 mm; c and d – after the push downwards by 50 and 100 mm; 1 – control signal; 2 – displacement of the hydropulsator rod; 3, 4 – displacements of the sprung weight at  $V_{st} = 18.6$  and  $38.6$  litres without the air damper; 5, 6 – displacements of the sprung weight at  $V_{st} = 18.6$  and  $38.6$  litres with the air damper

На рис. 6 и 7 показаны сводные результаты зависимости амплитуды первого

полупериода и времени затухания свободных затухающих колебаний от рабочего объема ПР при толчке поршня вверх и вниз.



**Зависимости собственной частоты, амплитуды первого полупериода  
и времени затухания колебаний от объема пневматической рессоры  
Dependences of the natural frequency, amplitude of the first half-cycle  
and damping time of oscillations on the displacement volume of the air spring**

Рабочий объем пневморессоры, л	Собственная частота колебаний ПР, Гц	Амплитуда первого полупериода колебаний, мм	Время затухания, с
толчок вверх ПР с ПМ на 50 мм			
11	1,75	34,2	1,7
18,6	1,35	31,8	1,49
18,6 с ВД	1,54	11,24	1,0
31	–	13,22	1,0
38,6	–	3,75	1,0
38,6 с ВД	–	1,5	1,0
толчок вверх ПР с ПМ на 100 мм			
11	1,67	88	1,92
18,6	1,25	70,8	1,5
18,6 с ВД	1,49	48	1,0
31	–	40,5	1,23
38,6	–	29,3	1,0
38,6 с ВД	–	16,6	1,0
толчок вниз ПР с ПМ на 50 мм			
11	1,84	23,6	1,6
18,6	1,35	22,4	1,42
18,6 с ВД	1,29	21,9	1,08
31	–	11,73	0,9
38,6	–	0	0,64
38,6 с ВД	–	0	0,63
толчок вниз ПР с ПМ на 100 мм			
11	1,81	46	1,81
18,6	1,28	43,7	1,78
18,6 с ВД	1,42	40,7	1,36
31	–	39,5	1,1
38,6	–	39	1,5
38,6 с ВД	–	42	1,17

Из анализа графиков на рис. 6 а видно, что увеличение рабочего объема с 11 до 38,6 л (кривая 1) при толчке поршня ПР вверх на 50 мм снижает амплитуду колебаний подрессоренной массы с 34,2 до 3,75 мм. Установка ВД в ПР с рабочим объемом 18,6 л (прямая 3) снижает амплитуду колебаний с 31,8 до 11,24 мм и практически не влияет на амплитуду при рабочем объеме 38,6 л (прямые 3, 4). По сравнению с толчком

вверх при толчке поршня ПР вниз на 50 мм (кривая 2) амплитуда колебаний подрессоренной массы уменьшается: с 34,2 и 31,8 мм до 23,6 и 22,4 мм – для ПР с рабочими объемами 11 и 18,6 л соответственно; с 13,22 и 3,75 мм до 11,73 и 0 мм – для ПР с рабочими объемами 31 и 38,6 л соответственно. Таким образом, увеличение объема ПР приводит к уменьшению амплитуды колебаний и снижению влияния направления толчка.

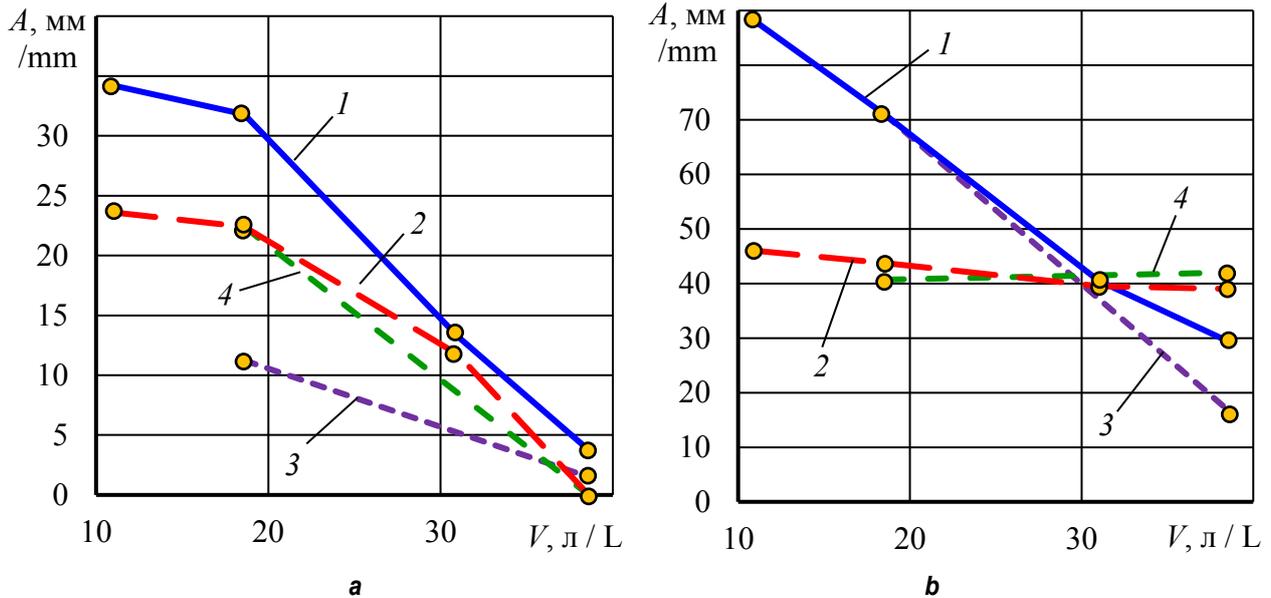


Рис. 6. Зависимости амплитуд колебаний подрессоренной массы на пневморессоре при различных рабочих объемах: а – при толчке вверх или вниз на 50 мм; б – при толчке вверх или вниз на 100 мм; 1 и 3 – толчок поршня ПР вверх; 2 и 4 – толчок поршня ПР вниз; 1 и 2 – без ВД; 3 и 4 – с ВД, установленным в поршне ПР

Fig. 6. Dependences of the oscillation amplitudes of the sprung weight on the air spring at different displacement volumes: a – at the push upwards or downwards by 50 mm; b – at the push upwards or downwards by 100 mm; 1 and 3 – piston push of the air spring upwards; 2 and 4 – piston push of the air spring downwards; 1 and 2 – without the air damper; 3 and 4 – with the air damper installed in the piston of the air spring

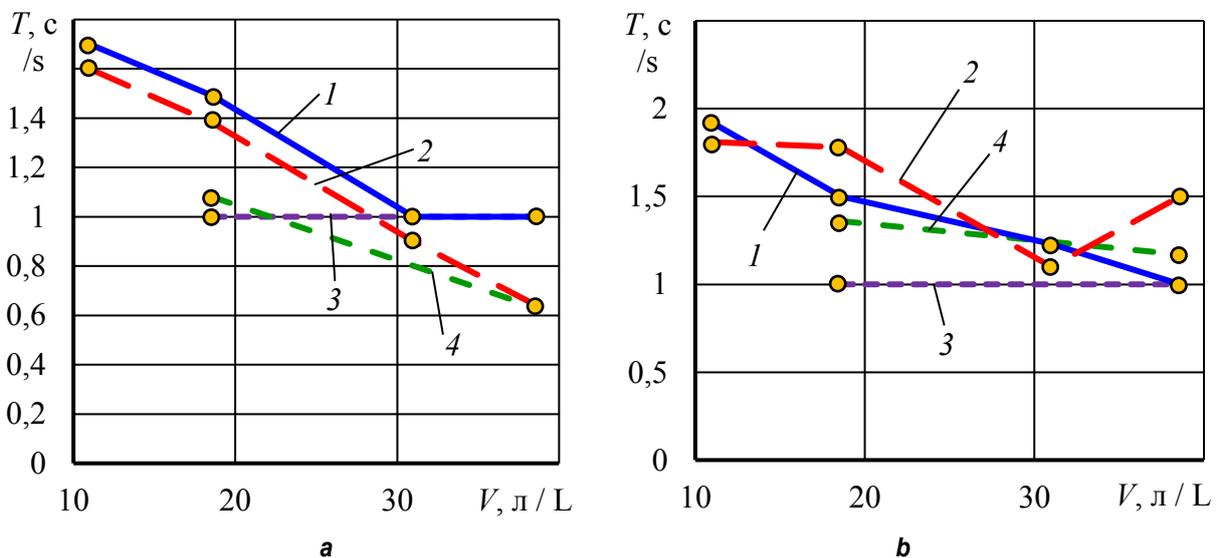


Рис. 7. Зависимости времени затухания колебаний подрессоренной массы на пневморессоре при различных рабочих объемах: а и б – при толчке вверх или вниз на 50 и 100 мм, соответственно; 1 и 3 – толчок поршня ПР вверх; 2 и 4 – толчок поршня ПР вниз; 1 и 2 – без ВД; 3 и 4 – с ВД, установленным в поршне ПР

Fig. 7. Dependences of the oscillation damping time of the sprung weight on the air spring at different displacement volumes: a and b – at the push upwards or downwards by 50 and 100 mm respectively; 1 and 3 – piston push of the air spring upwards; 2 and 4 – piston push of the air spring downwards; 1 and 2 – without an air damper; 3 and 4 – with the air damper installed in the piston of the air spring



Из сравнения графиков на рис. 6 а и б видно, что увеличение величины толчка штока гидропульсатора с 50 до 100 мм приводит к увеличению амплитуды колебаний подрессоренной массы примерно в 2,0–2,6 раза. При этом для рабочего объема ПР 31 л разница амплитуд колебаний ПМ при толчке поршня ПР на 50 и 100 мм вверх и вниз, соответственно, практически отсутствует.

Из рис. 7 а видно, что увеличение рабочего объема с 11 л до 38,6 л (кривая 1) при толчке поршня ПР вверх на 50 мм уменьшает время затухания колебаний ПМ с 1,7 до 1,0 с. По сравнению с толчком вверх при толчке поршня вниз на 50 мм время затухания колебаний ПМ уменьшается: с 1,7 до 1,6 с – для ПР с рабочим объемом 11 л; с 1,49 до 1,42 с – для ПР с рабочим объемом 18,6 л; с 1,0 до 0,64 с – для ПР с рабочим объемом 38,6 л (кривая 2). Применение в ПР с рабочим объемом 18,6 л ВД, установленного в поршне, уменьшает время затухания колебаний ПМ: с 1,49 до 1,0 с – при толчке поршня ПР вверх на 50 мм (кривая 3); с 1,42

до 1,08 с – при толчке поршня ПР вниз на 50 мм (кривая 4).

Из анализа графиков на рис. 7 б видно, что увеличение рабочего объема с 11 л до 38,6 л (кривая 1) при толчке поршня ПР на 100 мм вверх уменьшает время затухания колебаний ПМ с 1,92 до 1,0 с. По сравнению с толчком вверх толчок поршня вниз на 100 мм приводит к уменьшению времени затухания колебаний подрессоренной массы: с 1,92 до 1,81 с – для ПР с рабочим объемом 11 л; с 1,23 до 1,1 с – для ПР с рабочим объемом 31 л; к увеличению времени затухания: с 1,5 до 1,78 с – для ПР с рабочим объемом 18,6 л; с 1,0 до 1,5 с – для ПР с рабочим объемом 38,6 л (линия 2). Применение в ПР с рабочим объемом 18,6 л ВД, установленного в поршне, уменьшает время затухания колебаний ПМ: с 1,5 до 1,0 с – при толчке поршня ПР вверх на 100 мм (линия 3); с 1,78 до 1,36 с – при толчке поршня ПР вниз на 100 мм (линия 3). Для ПР с рабочим объемом 38,6 л и ВД при толчке поршня вниз на 100 мм время затухания колебаний уменьшается с 1,5 до 1,17 с (линии 3 и 4).

## Выводы

1. Разработанная методика испытаний основана на возбуждении свободных затухающих колебаний подрессоренной массы, весом 0,5 т, при задании кинематического импульсного воздействия на поршень ПР с помощью гидропульсатора на величину 50 и 100 мм вверх или вниз. Испытания проводились при разных рабочих объемах ПР и различных соотношениях переменного и постоянного объемов, соединенных между собой через воздушные демпфирующие системы.

2. Увеличение рабочего объема ПР до 18,6 л путем подключения к переменному объему 11 л постоянного объема 7,6 л удлиненного поршня приводит к снижению частоты собственных колебаний с 1,75 до 1,25 Гц и уменьшению общего времени затухания колебаний на 0,5 с. При этом, по сравнению с ПР без подключенного объема поршня, амплитуды колебаний уменьшаются незначительно.

3. Установка на удлиненном поршне ПР воздушного демпфера в виде дросселя диаметром 6 мм и обратного клапана, открытого на ходе сжатия, приводит к уменьшению общего времени затухания колебаний до 1,0 с и снижению амплитуды первого полупериода колебаний, примерно, в 1,5...2,5 раза. При толчке поршня ПР вниз на 50 и 100 мм воздушный демпфер, установленный в поршне ПР, не влияет на амплитуду колебаний ПМ.

4. Подключение к ПР ресивера, объемом 20 л, посредством шланга, длиной 1 м и диаметром сечения 20 мм, приводит к уменьшению амплитуд колебаний в 2 раза и сокращению времени затухания на 0,2...0,4 с, подрессоренная масса совершает всего одно полное колебание, а при подключении через демпфирующую систему еще и полости удлиненного поршня характер затухающих колебаний приближается к апериодическому закону.



5. Применение в ПР с подключенным ресивером дополнительно установленного на поршне воздушного демпфера незначительно уменьшает амплитуду и время затухания колебаний.

6. В процессе испытаний ПР с переменным объемом 11 л установлено, что по сравнению с импульсным подъемом задание резкого опускания подвески на 50 и 100 мм снижает амплитуды колебаний на 12 и 42 мм, соответственно.

7. При увеличении рабочего объема ПР с 11 до 31 л амплитуды колебаний подрессоренной массы после подъема и спуска на 50 и 100 мм становятся практически одинаковыми.

8. Дальнейшее увеличение рабочего объема ПР с 31 до 38,6 л приводит к снижению амплитуды колебаний в среднем на 10 мм при спуске и подъеме подрессоренной массы на 50 мм и 100 мм соответственно.

### Библиографический список

- Новиков В.В. Стендовые испытания пневмоподвески автобуса ВЗТМ-32731 с гидроамортизаторами разной мощности // Грузовик. 2007. № 6. С. 41–44.
- Новиков В.В. Стендовые испытания пневмоподвески с воздушным демпфером в виде дросселя и обратного клапана // Грузовик. 2007. № 7. С. 43–46.
- Фитилев Б.Н., Комочков В.А., Труханов В.М., Соболевский И.В. Гидропневматическая подвеска и ее упругодемпфирующие характеристики // Справочник. Инженерный журнал. 2007. № 11. С. 62–64.
- Новиков В.В., Дьяков А.С., Федоров В.А. Пневморессора с регулируемым по амплитуде и направлению воздушным демпфером // Автомобильная промышленность. 2007. № 10. С. 21–22.
- Хамитов Р.Н. Синтез системы управления импульсным электродинамическим клапаном пневмоамортизатора // Справочник. Инженерный журнал. 2008. № 2 (131). С. 62–65.
- Калашников Б.А. Системы амортизации объектов с дискретной коммутацией упругих элементов. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2008. 344 с.
- Фитилев Б.Н., Комочков В.А., Поздеев А.В. К расчету характеристик пневмоэлемента с воздушным демпфированием // Прогресс транспортных средств и систем – 2009: матер. Междунар. науч.-практ. конф., Волгоград, 13–15 окт. 2009 г.: в 2 ч. Ч. 2. Волгоград, 2009. С. 40–47.
- Новиков В.В., Рябов И.М., Чернышов К.В. Виброзащитные свойства подвесок автотранспортных средств. Волгоград, 2009. 338 с.
- Хамитов Р.Н., Аверьянов Г.С., Корчагин А.Б. Рабочие процессы двухкамерного пневматического амортизатора с кратковременной коммутацией объемов // Вестник машиностроения. 2009. № 10. С. 19–23.
- Новиков В.В., Поздеев А.В. Определение оптимальных алгоритмов регулирования активно-управляемых пневмоподвесок // Грузовик. 2010. № 5. С. 6–10.
- Чернышов К.В., Поздеев А.В., Новиков В.В., Рябов И.М. Определение условий оптимального регулирования жесткости пневматической подвески АТС // Грузовик. 2010. № 11. С. 2–5.
- Еременко А.В., Скакунов В.Н., Дьяков А.С., Олейников А.С. Пневматический виброподвес с микропроцессорным управлением демпфированием // Известия ВолгГТУ. Серия: Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь: межвуз. сб. науч. ст. Волгоград. 2010. Т. 4. № 3. С. 94–100.
- Хамитов Р.Н., Аверьянов Г.С. Системы амортизации крупногабаритных объектов с активными упругими и демпфирующими элементами. Омск: Изд-во Омского государственного технического университета, 2010. 123 с.
- Поздеев А.В. Коммутация полостей как способ повышения виброзащитных свойств двухкамерных пневматических рессор // Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития `2011: сб. науч. тр. SWorld по матер. Междунар. науч.-практ. конф. (г. Одесса, 04–15 октября 2011 г.). Одесса, 2011. Т. 2. С. 40–48.
- Поздеев А.В., Дьяков А.С., Новиков В.В., Рябов И.М. Исследования двухкамерной пневматической рессоры с коммутацией полостей // Грузовик. 2013. № 1. С. 35–37.
- Поздеев А.В., Дьяков А.С., Новиков В.В., Рябов И.М. Саморегулируемые двухкамерные пневматические рессоры с коммутацией полостей // Грузовик. 2013. № 9. С. 1–5.
- Поздеев А.В., Новиков В.В., Дьяков А.С., Похлебин А.В., Рябов И.М., Чернышов К.В. Регулируемые пневматические и пневмогидравлические рессоры подвесок автотранспортных средств. Волгоград: Изд-во Волгоградского государственного технического университета, 2013. 244 с.
- Дьяков А.С., Олейников А.С. Двухобъемная система пневматического подрессоривания с микропроцессорным управлением // Известия ВолгГТУ. Серия: Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах: межвуз. сб. науч. ст. Волгоград: Изд-во Волгоградского государственного технического университета, 2013. Т. 19. № 24 (127). С. 26–29.
- Горобцов А.С., Дьяков А.С., Олейников А.С. Активная система пневматического подрессоривания со ступенчатым изменением жесткости // Вестник машиностроения. 2015. № 4. С. 24–27.



20. Новиков В.В., Поздеев А.В., Чумаков Д.А., Голяткин И.А. Виброзащитные свойства пневматической подвески с динамическим гасителем колебаний колес и сухим трением // Оборонная техника. 2015. № 9–10. С. 102–106.
21. Зубарев А.В., Климентьев Е.В., Звонов А.О. Некоторые актуальные проблемы расчетов пневматических упругих элементов машин // Численные методы решения задач теории упругости и пластичности: матер. XXIV Всерос. конф. (г. Омск, 02–04 июня 2015 г.). Омск, 2015. С. 52–56.
22. Климентьев Е.В., Корнеев В.С., Корнеев С.А. Численный анализ работы пневматического амортизатора при стандартном режиме нагружения и разных алгоритмах управления // Омский научный вестник. 2015. № 3 (143). С. 138–145.
23. Климентьев Е.В., Кондюрин А.Ю., Пеньков И.А., Корнеев В.С., Корнеев С.А. Экспериментальный стенд для определения механических характеристик и термодинамических параметров пневмоэлементов с резинокордной оболочкой // Омский научный вестник. 2015. № 3 (143). С. 127–129.

24. Корнеев С.А., Корнеев В.С., Зубарев А.В., Климентьев Е.В. Основы технической теории пневматических амортизаторов. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2016. 147 с.
25. Чернышов К.В., Рябов И.М., Поздеев А.В. Выявление потенциальных виброзащитных свойств управляемой пневматической подвески автомобиля с алгоритмом управления, обеспечивающим рекуперацию энергии в цикле колебаний // Проектирование специальных машин для освоения горных территорий: материалы Междунар. науч.-практ. конф. (г. Владикавказ, 30 сентября – 2 октября 2016 г.). Владикавказ, 2016. С. 92–100.
26. Пат. № 167265, Российская Федерация, МПК F16F7/10, F16F9/19, F16F9/48, B60G13/18.. Пневматическая подвеска / В.В. Новиков, А.В. Поздеев, И.М. Рябов, К.В. Чернышов, Д.А. Чумаков; ВолгГТУ. 2016.
27. Пат. № 169805, Российская Федерация, МПК B60G13/18, F16F7/104, F16F13/22. Пневматическая подвеска / В.В. Новиков, А.В. Поздеев, И.М. Рябов, К.В. Чернышов, Д.А. Чумаков; ВолгГТУ. 2017.

### References

1. Novikov V.V. Test bench tests of VZTM-32731 bus air suspension with hydraulic shock absorbers of different capacities. *Gruzovik* [Truck], 2007, no. 6, pp. 41–44. (In Russian)
2. Novikov V.V. Test bench tests of the air suspension with an air damper in the form of a throttle and a back-pressure valve. *Gruzovik* [Truck ], 2007, no. 7, pp. 43–46. (In Russian)
3. Fitoliev B.N., Komochkov V.A., Truhanov V.M., Sobolevskij I.V. Hydropneumatic suspension and its elastic-damping characteristics. *Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal* [Handbook. An Engineering Journal], 2007, no. 11, p. 62–64. (In Russian)
4. Novikov V.V., Dyakov A.S., Fedorov V.A. Air spring with amplitude and direction adjustable air damper. *Avtomobil'naya promyshlennost'* [Automotive Industry], 2007, no. 10, pp. 21–22. (In Russian)
5. Khamitov R.N. Synthesis of the control system of a pulsed electrodynamic valve of a pneumatic shock absorber. *Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal* [Handbook. An Engineering Journal], 2008, no. 2, pp. 62–64. (In Russian)
6. Kalashnikov B. A. *Sistemy amortizatsii ob'ektov s diskretnoj kommutatsiej uprugikh ehlementov: monografiya* [Damping systems of objects with discrete commutation of elastic elements: monograph]. Омск: ОмГТУ Publ., 2008, 344 p. (In Russian)
7. Fitoliev B.N., Komochkov V.A., Pozdeev A.V. *K raschetu harakteristik pnevmoelementa s vozdushnym dempfirovaniem* [To air damping pneumatic element characteristics calculation]. *Materiali mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferencii "Progress transportnyh sredstv i sistem – 2009"* [Proceedings of International scientific and practical conference "Progress of Transport Means and Systems-2009", Volgograd, 13–

- 15 October 2009]. Volgograd, 2009, pp. 40–47. (In Russian)
8. Novikov V.V., Ryabov I.M., Chernyshov K.V. *Vibro-zashhitnye svoystva podvesok avtotransportnykh sredstv: monografiya* [Vibroprotective properties of vehicle suspensions: monograph]. Volgograd, VSTU Publ., 2009, 338 p. (in Russian)
9. Khamitov R.N., Averyanov G.S., Korchagin A.B. Operational processes in a dual-chamber pneumatic shock absorber with rapid switching. *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of Mechanical Engineering], 2009, no. 10, pp. 19–23. (In Russian)
10. Novikov V.V., Pozdeev A.V. Determination of optimal control algorithms for actively-controlled air suspensions. *Gruzovik* [Truck], 2010, no. 5, pp. 6–10. (In Russian)
11. Chernyshov K.V., Pozdeev A.V., Novikov V.V., Ryabov I.M. Determination of conditions for optimal adjustment of vehicle air suspension stiffness. *Gruzovik* [Truck], 2010, no. 11, pp. 2–5. (In Russian)
12. Eremenko A.V., Skakunov V.N., D'yakov A.S., Olejnikov A.S. Pneumatic vibration suspension with a microprocessor control of damping. *Izvestiya VolgGTU. Seriya "Elektronika, izmeritel'naya tekhnika, radio-tekhnika i svyaz"* [News of VSTU. Series "Electronics, measuring technology, radio engineering and communications"]. Volgograd, 2010, vol. 4, no. 3, pp. 94–100. (In Russian)
13. Khamitov R.N., Averyanov G.S. *Sistemy amortizatsii krupnogabaritnykh ob'ektov s aktivnymi uprugimi i dempfiruyushchimi ehlementami: monografiya* [Damping for large-sized objects with active elastic and damping elements: monograph]. Омск: Омск state technical University Publ., 2010, 123 p. (In Russian)
14. Pozdeev A.V. *Kommutatsiya polostej kak sposob povysheniya vibrozashhitnykh svoystv dvukhkamernykh*



*pnevmaticheskikh ressor* [Cavity switching as a way to improve the vibration protection properties of two-chamber pneumatic springs]. *Nauchnye issledovaniya i ih prakticheskoe primeneniye. Sovremennoe sostoyaniye i puti razvitiya`2011: sbornik nauchnykh trudov SWorld po materialam Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Scientific researches and their practical application. Current state and development trends of `2011: collection of SWorld scientific papers by the materials of International scientific and practical conference]. Odessa, 2011, pp. 40–48. (In Russian)

15. Pozdeev A.V., D'yakov A.S., Novikov V.V., Ryabov I.M. Research of a dual-chamber pneumatic spring with switching of cavities. *Gruzovik* [Truck], 2013, no. 1, pp. 35–37. (In Russian)

16. Pozdeev A.V., D'yakov A.S., Novikov V.V., Ryabov I.M. Self-adjustable dual-chamber pneumatic springs with volumes commutation. *Gruzovik* [Truck], 2013, no 9, pp. 2–5. (in Russian)

17. Pozdeev A.V., Novikov V.V., Dyakov A.S., Pohleven A.V., Ryabov I.M., Chernyshov K.V. *Reguliruemyye pnevmaticheskie i pnevmogidravlicheskie resory podvesok avtotransportnykh sredstv: monografiya* [Adjustable pneumatic and pneumohydraulic springs of vehicle suspensions: monograph]. Volgograd: Volgograd state technical University Publ., 2013, 244 p. (in Russian)

18. Dyakov A.S., Oleinikov A.S. Two-volume pneumatic suspension system with microprocessor control. *Izvestiya VolgGTU. Seriya "Aktual'nye problemy upravleniya, vychislitel'noy tekhniki i informatiki v tekhnicheskikh sistemah"* [News of VSTU. Series "Actual problems of control, computer science and informatics in technical systems"]. Volgograd: Volgograd state technical University Publ., 2013, vol. 19, no. 24 (127), pp. 26–29. (in Russian)

19. Gorobtsov A.S., Dyakov A.S. Oleinikov A.S. Active system of pneumatic springing with stepped stiffness variation. *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of Mechanical Engineering], 2015, no. 4, pp. 24–27. (in Russian)

20. Novikov V.V., Posdeev A.V., Chumakov D., Golyatkin I.A. Vibroprotective properties of a pneumatic suspension with a dynamic damper of wheel vibration and dry friction. *Oboronnaya tekhnika* [Defense Technology], 2015, no. 9–10, pp.102–106. (in Russian)

21. Zubarev A.V., Klimentyev E.V., Zvonov A.O. *Nekotorye aktual'nye problemy raschetov pnevmaticheskikh uprugih ehlementov mashin* [Some actual prob-

#### Критерии авторства

Новиков В.В., Поздеев А.В., Чумаков Д.А. провели анализ влияния воздушного демпфирования и различных сочетаний переменного и постоянного объема пневматической рессоры на ее демпфирующие свойства. Авторы совместно подготовили рукопись и несут ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

lems of calculations of pneumatic elastic machine elements ]. *Materiali XXIV Vserossiyskoy konferentsii "Chislennyye metody resheniya zadach teorii uprugosti i plastichnosti"* [Materials of XXIV All-Russian Conference "Numerical methods for solving problems in the theory of elasticity and plasticity" Omsk, 2–4 June, 2015]. Omsk, 2015, pp. 52–56. (in Russian)

22. Klimentyev E.V., Korneev V.S., Korneev S.A. Numerical analysis of pneumatic shock absorber at standard mode, loading and various control algorithms. *Omskiy nauchnyy vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2015, no. 3 (143), pp. 138–145. (in Russian)

23. Klimentyev E.V., Kondurin A.Yu., Pen'kov I.A., Korneev V.S. Korneev S.A. Experiment stand for determining the mechanical properties and thermodynamic parameters of pneumatic elements with rubber-shell. *Omskiy nauchnyy vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2015, no. 3 (143), pp. 127–129. (in Russian)

24. Korneev S.A., Korneev S.V., Zubarev A.V., Klimentyev E.V. *Osnovy tekhnicheskoy teorii pnevmaticheskikh amortizatorov: monografiya* [Fundamentals of the technical theory of pneumatic shock absorbers: monograph]. Omsk: Omsk state technical University Publ., 2016, 147 p. (in Russian)

25. Chernyshov K.V., Ryabov I.M., Pozdeev A.V. *Vyavleniye potentsial'nykh vibrozashhitnykh svoystv upravlyaeмой pnevmaticheskoy podveski avtomobilya s algoritmom upravleniya, obespechivayushhim rekuperatsiyu ehnergii v tsikle kolebanij* [Identification of potential vibroprotective properties of the controlled air suspension of a vehicle with a control algorithm providing energy recovery in an oscillation cycle]. *Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii "Proektirovaniye spetsial'nykh mashin dlya osvoeniya gornyykh territorij"* [Materials of the international scientific and practical conference "Designing special machines for development of mountain territory development", Vladikavkaz, September 30-October 2, 2016]. Vladikavkaz, 2016, pp. 92–100. (in Russian)

26. Novikov V.V., Pozdeev A.V., Ryabov I.M., Chernyshov K.V., Chumakov D.A. *Pnevmaticheskaya podveska* [Pneumatic suspension]. Patent RF, no. 167265, 2016.

27. Novikov V.V., Pozdeev A.V., Ryabov I.M., Chernyshov K.V., Chumakov D.A. *Pnevmaticheskaya podveska* [Pneumatic suspension]. Patent RF, no. 169805, 2017.

#### Authorship criteria

Novikov V.V., Pozdeev A.V., Chumakov D.A. have analyzed the effect of air damping and various combinations of variable and constant volume of the pneumatic spring on its damping properties. The authors jointly prepared the manuscript for publication and bear equal responsibility for plagiarism.

#### Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.



Оригинальная статья / Original article

УДК 629.3.027.5

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-10-227-238>

## НЕОБХОДИМОСТЬ НАУЧНО ОБОСНОВАННОГО ВЫБОРА СЕРИИ ПРОФИЛЯ ШИН ПРИ ИХ ЗАМЕНЕ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ

© И.М. Рябов<sup>1</sup>, К.В. Чернышов<sup>2</sup>, А.В. Поздеев<sup>3</sup>, Ш.М. Мухучев<sup>4</sup>, Ю.М. Мухидинов<sup>5</sup>

<sup>1,2,3</sup>Волгоградский государственный технический университет,  
400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28.

<sup>4,5</sup>Махачкалинский филиал Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета,  
367026, Российская Федерация, г. Махачкала, пр. Акушинского, 13.

**РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ** данной работы: обосновать необходимость научного выбора серии профиля шин при их замене для обеспечения безопасности автотранспортных средств. **МЕТОДЫ.** В работе использованы методы математической статистики и математического моделирования, а также выполнен подробный анализ научно-технической документации по теме. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** В статье приведены статистические данные по износу протектора шин и амортизаторов, а также критерии критического порога их ресурса. Описаны особенности выбора для замены шин более низкой серии. Приведены результаты и анализ сравнительных испытаний по оценке влияния износа амортизаторов на тормозной путь автомобилей, оборудованных и не оборудованных системами ABS и ESP. Приводится формула для определения условной вероятности совпадения аварийной ситуации с движением автомобиля с отрывами колес и результаты расчетов по ней. Сделан вывод, что эта вероятность для дорожных условий на территории Российской Федерации может быть больше 20 %. Построены и проанализированы амплитудно-частотные характеристики относительных ускорений кузова автомобиля и перемещений колес. Отмечено, что при замене изношенных шин на шины более низкого профиля (даже при исправных амортизаторах) колебания колес значительно увеличиваются (в два раза), что повышает вероятность отрыва колес от дороги и снижает безопасность движения автотранспортных средств. **ВЫВОДЫ.** Для повышения безопасности движения автотранспортных средств необходимо разработать методику научно обоснованного выбора серии профиля шин при их замене, с учетом состояния амортизаторов.

**Ключевые слова:** автомобиль, колеса, отрыв колеса от дороги, амортизаторы, амплитудно-частотные характеристики, тормозной путь.

**Информация о статье.** Дата поступления 07 июня 2018 г.; дата принятия к печати 28 сентября 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 октября 2018 г.

<sup>1</sup>Рябов Игорь Михайлович, доктор технических наук, профессор кафедры автомобильных перевозок, e-mail: rjabov1603@mail.ru

Igor M. Ryabov, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Automobile Transport, e-mail: rjabov1603@mail.ru

<sup>2</sup>Чернышов Константин Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры технической эксплуатации и ремонта автомобилей, e-mail: chernykv@rambler.ru

Konstantin V. Chernyshov, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Vehicle Technical Operation and Repair, e-mail: chernykv@rambler.ru

<sup>3</sup>Поздеев Алексей Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматических установок, e-mail: pozdeev.vstu@gmail.com

Alexey V. Pozdeev, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Automatic Installations, e-mail: pozdeev.vstu@gmail.com

<sup>4</sup>Мухучев Шамиль Магомедович, старший преподаватель кафедры организации перевозок и дорожного движения, e-mail: muhuch05@gmail.com

Shamil M. Mukhuchev, Senior Lecturer of the Department of Transportation and Road Traffic Organization, e-mail: muhuch05@gmail.com

<sup>5</sup>Мухидинов Юсуп Мухтарович, старший преподаватель кафедры организации перевозок и дорожного движения, e-mail: mfmadi@dgestan.ru

Yusup M. Mukhidinov, Senior Lecturer of the Department of Transportation and Road Traffic Organization, e-mail: mfmadi@dgestan.ru



**Формат цитирования.** Рябов И.М., Чернышов К.В., Поздеев А.В., Мухучев Ш.М., Мухидинов Ю.М. Необходимость научно обоснованного выбора серии профиля шин при их замене для обеспечения безопасности // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 10. С. 227–238. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-227-238

## NEED FOR A SCIENTIFICALLY BASED SELECTION OF TIRE PROFILE SERIES AT TIRE REPLACEMENT FOR SAFETY PROVISION

I.M. Ryabov, K.V. Chernyshov, A.V. Pozdeev, Sh.M. Mukhuchev, Yu.M. Mukhidinov

Volgograd State Technical University,  
28, Lenin pr., Volgograd, 400005, Russian Federation  
Makhachkala branch of Moscow Automobile and Road Construction State Technical University,  
13, Akushinsky pr., Makhachkala, 367026, Russian Federation

**ABSTRACT. PURPOSE.** The purpose of the paper is to justify the need for a scientific selection of a series of tire profiles when replacing tires in order to ensure vehicle safety. **METHODS.** The study uses the methods of mathematical statistics, mathematical modeling and provides a detailed analysis of the scientific and technical documentation on the topic of the research. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The article presents the statistical data on the wear of tire protector and shock absorbers and provides the criteria for the critical threshold of their life. Description is given to the selection features of lower series tire replacement. The results and analysis of comparative tests on the evaluation of shock absorber wear effect on the braking length of vehicles equipped and not equipped with ABS and ESP systems are presented. A formula is given for determining the conditional probability of the coincidence between the road accident and vehicle movement with wheel breakaways from the road. The results of calculations by the formula are presented as well. It is concluded that this probability can be more than 20% for road conditions in the territory of the Russian Federation. The amplitude-frequency characteristics of the relative accelerations of the vehicle body and wheel movements are constructed and analyzed. It is noted that the replacement of worn tires with the tires of a lower profile even if shock absorbers are serviceable significantly raises wheel vibrations (2 times), which increases the likelihood of wheel breakaway from the road and reduces the safety of motor vehicles. **CONCLUSIONS.** It is necessary to develop a methodology for scientifically based selection of a tire profile series when replacing tires taking into account the condition of shock absorbers in order to improve the safety of motor vehicles.

**Keywords:** vehicle, wheels, wheel breakaway from the road, shock absorbers, amplitude-frequency characteristics, braking length

**Information about the article.** Received June 07, 2018; accepted for publication September 28, 2018; available online October 31, 2018.

**For citation.** Ryabov I.M., Chernyshov K.V., Pozdeev A.V., Mukhuchev Sh.M., Mukhidinov Yu.M. Need for a scientifically based selection of tire profile series at tire replacement for safety provision. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 10, pp. 227–238. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-227-238 (In Russian)

## Введение

За срок службы автомобиля его шины заменяют несколько раз. Согласно временным нормам эксплуатационного пробега шин автотранспортных средств рд 3112199-1085-02, утвержденных Минтрансом Российской Федерации в 2002 г., которые действуют в настоящее время, средне-статистический пробег легковых шин зарубежного производства и стран СНГ до износа протектора составляет 40...60 тыс. км [1]. Критерием критического порога ресурса шин является уменьшение высоты протек-

тора до минимально допустимой по безопасности легковых шин величины 1,6 мм, после чего их эксплуатация запрещена, поэтому их на автомобиле заменяют. Для замены автомобилисты вместо шин, установленных изготовителем автомобиля, например, серии выше 80, часто выбирают хорошо рекламируемые низкопрофильные серии 70...65, а иногда – сверхнизкопрофильные шины (серии, ниже 65). Соответствие шины той или иной серии определяется отношением высоты  $H$  профиля к его ширине  $B$ , выраженным в процентах (рис. 1).

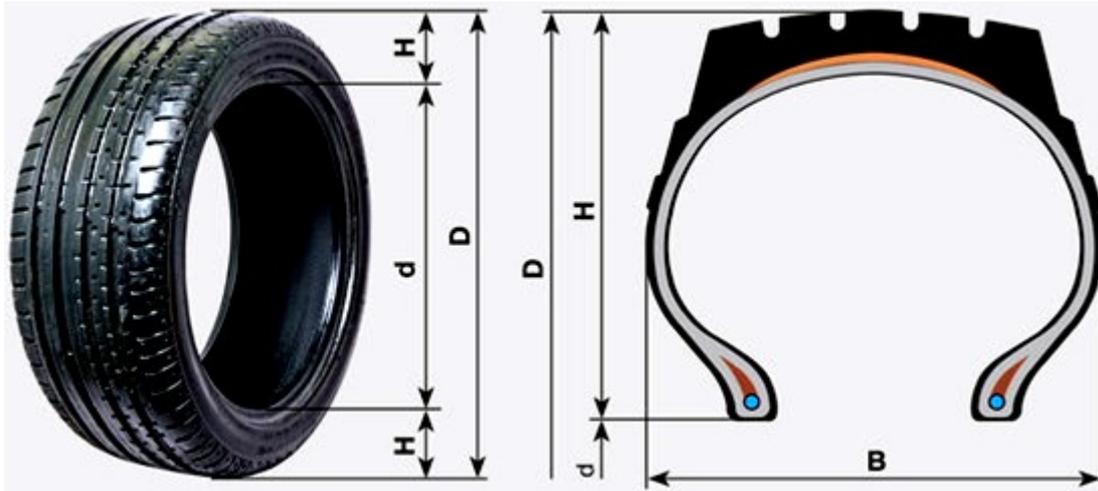


Рис. 1. Основные размеры шины:  $D$  – наружный диаметр шины;  $H$  – высота профиля шины;  $B$  – ширина профиля шины;  $d$  – посадочный диаметр шины  
Fig. 1. Main tire dimensions:  $D$  – outer tire diameter;  $H$  – height of tire profile;  $B$  – width of tire profile;  $d$  – diameter at rim seat

Высота профиля шины  $H$  определяется половиной разности между ее наружным  $D$  и посадочным  $d$  диаметрами, а ширина профиля  $B$  определяется на шине, накачанной до нормативного давления в самом широком месте ее профиля без учета технологических выступов, гравировки и надписей на поверхности шины. Особенностью выбора для замены изношенных шин, а также шин более низкой серии является то, что наружный диаметр новой шины, определяемый по длине окружности, не должен сильно изменяться, чтобы сохранить клиренс автомобиля и не допустить касания шины за нишу кузова (табл. 1) [2]. Поэтому при замене изношенных шин на шины

более низкой серии, отличающейся на 10 единиц и более, необходимо также приобрести обод другого типоразмера, у которого посадочный диаметр на 1–3 дюйма больше (табл. 1). Например, если при замене низкопрофильных шин серии 70 (номинальный посадочный диаметр шины на обод колеса 14 дюймов, обозначение 195/70R14) выбрали для замены сверхнизкопрофильные шины серии 40 (обозначение 255/70R17), то необходимо приобрести 4 колеса с номинальным посадочным диаметром шины на обод 17 дюймов, т. е. на 3 дюйма больше, что потребует существенных дополнительных затрат.

### Недостатки низкопрофильных шин

При рекламировании низкопрофильных шин, как правило, умалчивают об их недостатках, которые проявляются при эксплуатации автомобиля на неровных дорогах Российской Федерации (рис. 2). Умалчивают о том, что такая замена шин снижает комфортность езды на автомобиле (ресурс шины и обода), а главное – снижает безопасность.

1. Главным недостатком низкопрофильных шин является то, что они плохо сглаживают даже короткие неровности дороги, так как имеют очень маленькую длину

пятна контакта с дорогой и большую радиальную жесткость. Низкопрофильные и сверхнизкопрофильные шины вследствие большой жесткости имеют небольшой статический прогиб (10–17 мм), который соизмерим и даже меньше высоты наиболее вероятных неровностей цементобетонных и асфальтобетонных дорог в Российской Федерации. Колебания колес от воздействия неровностей на такие шины при увеличении скорости становятся более интенсивными и приводят к частым отрывам шин от дороги и прекращению передачи на дорогу управля-



Таблица 1

*Параметры низкопрофильных шин серии 70...40*

Table 1

*Parameters of low profile tires of series 70...40*

Посадочный диаметр шины на обод, дюйм	14"	15"	15"	16"	16"	17"
Отклонение посадочного диаметра шины на обод, дюйм	–	+1	+1	+2	+2	+3
Обозначение шины	195/70R14	195/65R15	205/60R15	225/50R16	245/45R16	255/40R17
Серия	70	65	60	50	45	40
Длина окружности, мм	1978	1994	1969	1985	1950	1978
Соответствие длины окружности с номинальным значением, %	100	100,8	99,5	100,3	98,6	100
Ширина профиля шины, мм	195	195	205	225	245	255

ющих и тормозных сил, что резко снижает безопасность автомобиля. На большой скорости автомобиль становится подобным потерянному управлению самолету, поскольку управление потеряно, а остановиться быстро невозможно. При этом не только резко ухудшается управляемость и устойчивость движения автомобиля, но и удлиняется его тормозной путь, что увеличивает риск возникновения аварийной ситуации и ДТП.

Проведенные исследования микропрофилей дорог [3] показали (рис. 3), что с вероятностью 90% средняя квадратическая высота неровностей для цементобетонных дорог не превышает 6–12 мм (кривые 1 и 2), для асфальтобетонных дорог – 18 мм (кривая 3), для грунтовой дороги – 23 мм (кривая 4) и для булыжной дороги – 29 мм (кривая 5).

2. Низкопрофильные и сверхнизкопрофильные шины плохо защищают обод колеса от повреждения. Практика показывает, что пробить шину с такой малой высотой профиля и при этом погнуть или расколоть обод колеса при въезде на скорости в стандартную для наших дорог яму – обычное явление.

3. Из-за увеличения ширины пятна контакта низкопрофильные шины требуют приложения большего момента для поворота колеса неподвижного автомобиля, что

увеличивает нагрузки на детали и механизмы рулевого управления автомобилем и снижает их надежность, требует прилагать большие усилия к рулевому колесу.

4. Низкопрофильные шины создают больший шум, чем шины, установленные изготовителем автомобиля.

5. У них большая склонность к аквапланированию – также связанная с увеличением ширины шины, из-за которой сложнее отводить воду из пятна контакта.

6. Они требуют повышенного внимания к уровню давления. Его нужно чаще проверять, так как даже небольшая потеря давления грозит повреждениями, как самой шины, так и обода.

7. Существенным недостатком низкопрофильных шин является высокая цена. Причем, мало того, что низкопрофильные и сверхнизкопрофильные шины стоят существенно дороже шин, установленных изготовителем автомобиля, но и для их установки на автомобиль необходимо еще покупать новые колеса с большей шириной и с большим радиусом.

8. Увеличение сил, передаваемых колесом на подвеску, что повышает нагруженность упругого элемента и амортизатора, сокращает их надежность и ресурс.

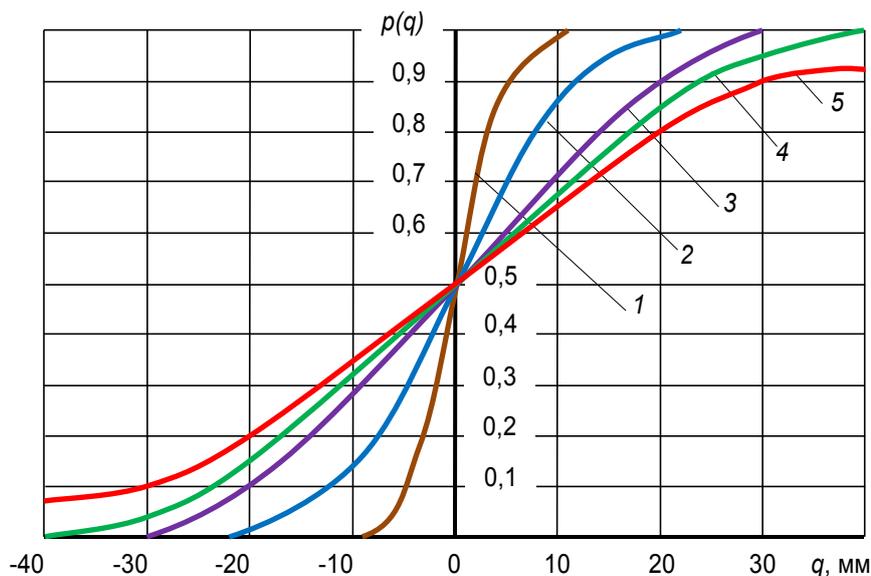


a



b

**Рис. 2. Изношенные покрытия на городской (a) и загородной (b) дорогах**  
**Fig. 2. Worn pavements of city (a) and country (b) roads**



**Рис. 3. Функции распределения ординат микропрофиля автомобильных дорог с покрытиями:**  
**1 и 2 – цементобетонным; 3 – асфальтобетонным; 4 – грунтовым (автодром); 5 – булыжным**  
**Fig. 3. Distribution functions of motor road micro profile ordinates with the following road pavements:**  
**1 and 2 – cement concrete; 3 – bituminous concrete; 4 – dirt road (testing track); 5 – cobblestone**

9. Увеличение сил, передаваемых колесом на дорогу, что ускоряет разрушение дорожного покрытия.

Следует отметить, что перечисленные существенные недостатки низкопрофильных шин при их использовании на дорогах Российской Федерации не останавли-

вают автомобилистов от выбора именно таких, и даже сверхнизкопрофильных шин. Исходя только из эстетических предпочтений, автомобилисты часто устанавливают эти шины даже на автомобили высокой проходимости, ухудшая их безопасность и другие эксплуатационные свойства в сложных дорожных условиях.



## Оценка влияния износа амортизаторов на тормозной путь автомобилей

При замене шин автомобилисты, как правило, не обращают внимания на степень износа гидравлических амортизаторов автомобиля. Амортизаторы должны обеспечивать безопасность и комфортабельность движения автомобиля путем улучшения стабильности контакта шин с дорогой и снижения резонансных колебаний кузова и колес.

Однако исследования, проведенные немецкой Ассоциацией технического надзора (TUV) показали, что амортизаторы достигают критического порога ресурса через 60...80 тыс. км [4]. Такой же результат был получен при анализе статистики сервисных станций [5], приведенной на рис. 4.

Критерием критического порога их ресурса является снижение создаваемых сил сопротивления на 25 %. Анализ рис. 4 показывает, что наиболее вероятный ресурс штатных амортизаторов автомобилей ВАЗ семейства «Самара» составляет около 70 тыс. км.

Выход амортизаторов из строя приводит к ускоренному износу или даже к поломке тормозных механизмов, повышается нагрузка и ускоряется износ многих деталей и узлов ходовой части: подшипников ступиц, пружин или рессор, опор стоек подвески, резинометаллических шарниров, шаровых шарниров, узлов рулевого управления, шарниров равных угловых скоростей. Например, через несколько тысяч километров может выйти из строя опорный подшипник стойки. При наличии даже небольшого дисбаланса колес (а идеально балансировать колеса невозможно) происходит интенсивный и неравномерный износ протектора шины, срок ее службы значительно сокращается.

При выходе амортизаторов из строя уменьшается реальная скорость автомобиля, поскольку пробои подвески возникают при меньшей скорости. Возможен увод в сторону при торможении на средних и высоких скоростях. Однако водители не имеют информации как об ухудшении состояния гидроамортизаторов и увеличившемся тор-

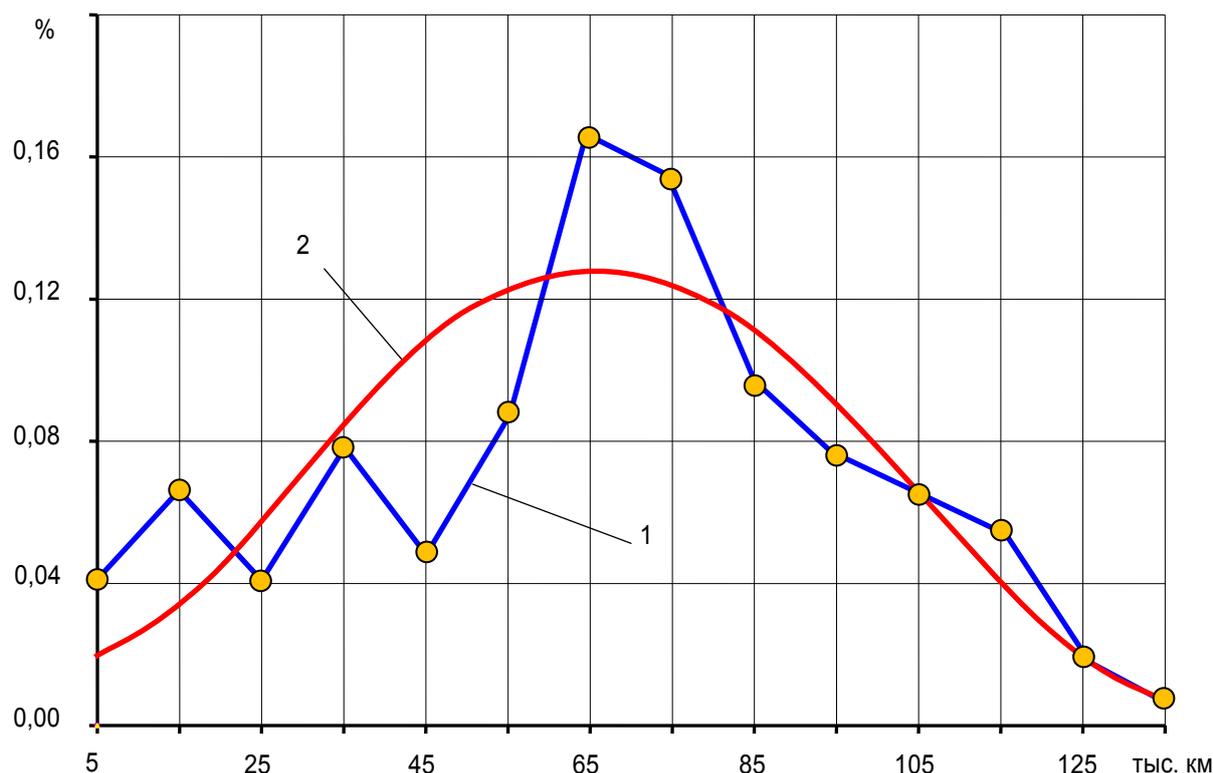
можном пути автомобиля, так и о возникшей проблеме безопасности автомобиля.

Эта проблема не решена, поскольку в действующем в настоящее время в Российской Федерации стандарте ГОСТ Р 51709-2001, устанавливающем требования к техническому состоянию и методам их проверки при допуске к эксплуатации автомобилей [6], а также в Техническом регламенте Таможенного союза ТР ТС 018/2011 «О безопасности колесных транспортных средств» [7], требования к амортизаторам, элементам подвески и высоте профиля шин отсутствуют, поэтому при техническом осмотре автомобиля они не проверяются.

Таким образом, в Российской Федерации разрешена эксплуатация автомобилей с неисправными амортизаторами, т.к. при техническом осмотре они не проверяются.

Существует много способов диагностики амортизаторов, однако корректная проверка исправности амортизатора может быть выполнена только в условиях профессионального сервиса на специализированном стенде или с помощью тестеров. Однако здесь начинаются проблемы, поскольку стендов для проверки амортизаторов на обычном независимом сервисном центре нет. Ведущими производителями данного оборудования являются зарубежные компании, такие как Maha, Nussbaum, Bosch и другие. Российские производители, которые предлагают линии технического контроля, как правило, используют для проверки качества демпфирования модули зарубежного производства. Владельцы автосервисов не спешат приобретать такое оборудование и создавать специальные посты для проверки состояния амортизаторов, поскольку не верят в то, что эту услугу можно продать.

Наблюдение за отношением водителей к технической эксплуатации автомобилей показывает, что до тех пор, пока амортизатор не течет и не стучит, убедить владельца автомобиля в том, что он уже неисправен, очень сложно. Даже если амортиза-



**Рис. 4. Распределение наработки до отказа задних амортизаторов автомобилей ВАЗ семейства «Самара»: 1 – фактическое распределение; 2 – расчетное распределение**

**Fig. 4. Distribution of operating time before the failure of rear shock absorbers of VAZ vehicles of Samara family: 1 – actual distribution; 2 – calculated distribution**

торный стенд однозначно установит, что качество демпфирования уже абсолютно не соответствует нормам безопасности, водитель часто игнорирует предложение о его замене. Менять амортизаторы он пойдет только тогда, когда уже без всякой стендовой диагностики будет ясно, что они не работают. Поэтому тестеры подвески или амортизаторов на рынке не востребованы и почти не поставляются. Многие владельцы автосервисов считают, что водители сами в состоянии определить качество работы амортизаторов. Но это заблуждение: путем самостоятельного тестирования можно оценить только комфортность движения, но никак не качество сцепления колеса с дорогой. А ведь именно сцепление колеса с дорогой является основной функцией амортизатора.

Таким образом, при износе амортизаторов возникает опасная ситуация, когда

комфортность движения сохраняется на довольно высоком уровне, а контакт шины с неровной поверхностью дороги уже значительно ухудшился. Риск дорожно-транспортного происшествия (ДТП) увеличивается, поскольку водитель не знает о том, что в экстремальной ситуации амортизатор не уменьшит колебания колес. Это приведет к потере контроля над управлением автомобилем и увеличению тормозного пути.

Известно, что при снижении уровня демпфирования усиливаются колебания колес, что увеличивает тормозной путь автомобиля [8]. Результаты сравнительных испытаний по оценке влияния сильно изношенных амортизаторов (на 50 %) на тормозной путь автомобилей, оборудованных антиблокировочной системой (ABS) и без нее, при прямолинейном движении на сухой неровной дороге со скоростью 80 км/ч приведены в табл. 2.



Таблица 2

**Результаты сравнительных испытаний по оценке влияния износа амортизаторов на тормозной путь автомобилей, оборудованных и не оборудованных системами ABS и ESP**

Table 2

**Results of comparative tests on the estimation of shock absorber wear effect on the braking length of vehicles equipped and not equipped with ABS and ESP systems**

Тормозная система автомобиля	Тормозной путь автомобилей на неровной дороге с новыми и изношенными амортизаторами со скорости 80 км/ч, м	
	Новые амортизаторы	Амортизаторы с износом 50 %
без ABS	37,5	39,1 (+ 4,3%)
с ABS	38,2	43,6 (+ 14,1%)
без ESP	30,7	33,5 (+ 9,1%)
с ESP	30,3	36,4 (+ 20,1%)

Анализ табл. 2 показывает, что тормозной путь автомобилей с изношенными амортизаторами существенно увеличивается, причем у автомобилей с электронными тормозными системами ABS и ESP, работа которых основана на сигналах от датчиков колес, он увеличивается значительно больше, чем у автомобилей без этих

систем. Это связано с тем, что эффективность электронных тормозных систем ABS и электронных систем курсовой стабилизации (ESP) при интенсивных колебаниях колес ухудшается вследствие резкого изменения угловой скорости колес при их отрывах от дороги.

**Оценка влияния жесткости шин на колебания кузова автомобиля  
Evaluation of the influence of tires' stiffness on the fluctuations of the car's body**

В монографии Р.В. Ротенберга [3] приводится формула для определения условной вероятности совпадения аварийной ситуации с движением автомобиля с отрывами колес

$$P_c = \frac{P_{omp}}{np_a p_{nc}}, \quad (1)$$

где  $P_{omp}$  – вероятность отрыва колес;  $n$  – срок службы автомобиля;  $p_a$  – среднегодовая вероятность попадания автомобиля в аварийную ситуацию;  $p_{nc}$  – вероятность появления происшествий, связанных с потерей сцепления колес с дорогой.

В работе [3] по европейским данным предлагается принять  $P_{omp} = 0,01$ ;  $n = 10$ ;  $p_a = 0,03$ ;  $p_{nc} = 0,375$ . Тогда по формуле (1) получается, что условная вероятность совпадения аварийной ситуации с движением

автомобиля с отрывами колес  $P_c = 0,09$ .

Для дорожных условий Российской Федерации в связи большей высотой неровностей и вероятностью отрывов колес условная вероятность совпадения аварийной ситуации с движением автомобиля с отрывами колес может быть больше 20 %. Если при замене изношенных шин выбирают шины более низкой серии, которые обладают большей радиальной жесткостью, то вероятность отрывов колес увеличивается.

Для оценки влияния повышения жесткости шин на колебания кузова автомобиля по уравнениям, приведенным в работах авторов [9–15], построим амплитудно-частотные характеристики его относительных ускорений  $\ddot{z}_v/q_0$  и перемещений  $\zeta_v/q_0$  колес (рис. 5) путем математического моделирования этих уравнений в приложении SIMULINK программного комплекса MATHWORCS MATLAB.



Анализ рис. 5 показывает, что повышение жесткости шин при неизменных упругих и демпфирующих параметрах подвески приводит к значительному увеличению ускорений кузова  $\ddot{z}_v/q_0$  поддрессоренной массы автомобиля и перемещений колес  $\zeta_v/q_0$ , а также расширению области высокочастотного резонанса колес с  $B_1$  до  $B_2$ , что ухудшает плавность движения автомобиля и повышает вероятность отрывов колес от дороги.

Исследования микропрофиля дорог, проведенные Н.Н. Яценко и др. [11], показали, что на дорогах с твердым покрытием наиболее вероятными являются неровности длиной 0,5...2,5 м, что позволяет, анализируя рис. 5, сделать следующие выводы:

1) низкочастотный резонанс кузова автомобиля охватывает очень узкие обла-

сти частот  $A_1$  и  $A_2$  и маловероятен, поскольку резонансные скорости движения даже при проезде самых длинных из наиболее вероятных неровностей (2,5 м) составляют 10–15 км/ч, т.е. меньше эксплуатационных скоростей;

2) высокочастотный резонанс колес на шинах охватывает широкие области частот  $B_1$  и  $B_2$  и весьма вероятен в диапазоне эксплуатационных скоростей движения автомобиля 10–110 км/ч (область  $B_1$ ) для шин, установленных изготовителем автомобиля, и 15–180 км/ч для низкопрофильных шин (область  $B_2$ );

3) при замене шин, установленных изготовителем автомобиля, на сверхнизкопрофильные шины даже при исправных амортизаторах колебания колес значительно (до 2 раз) увеличиваются, что повышает вероятность отрыва колес от дороги и снижает безопасность движения.

## Выводы

Таким образом, в настоящее время в Российской Федерации отсутствуют требования к техническому состоянию амортизаторов автотранспортных средств и методам их проверки при допуске автомобилей к эксплуатации, при техническом осмотре автомобиля они не проверяются. Автомобилисты не знают, что при замене изношенных шин на шины более низкого профиля резко снижается безопасность движения автомобиля, поскольку при этом колеса на неровной дороге совершают более интенсивные колебания и часто отрываются от дороги. Периодическая потеря контакта шин с дорогой ухудшает важные для безопасности автомобиля эксплуатационные свойства: устойчивость и управляемость движения, а также тормозные свойства. Известные электронные системы (ABS и ESP) в этом случае только усугубляют ситуацию, поскольку увеличивают тормозной путь.

В Техническом регламенте Таможенного союза ТР ТС 018/2011 «О безопасности колесных транспортных средств» отмечается, что транспортные средства должны быть укомплектованы шинами согласно экс-

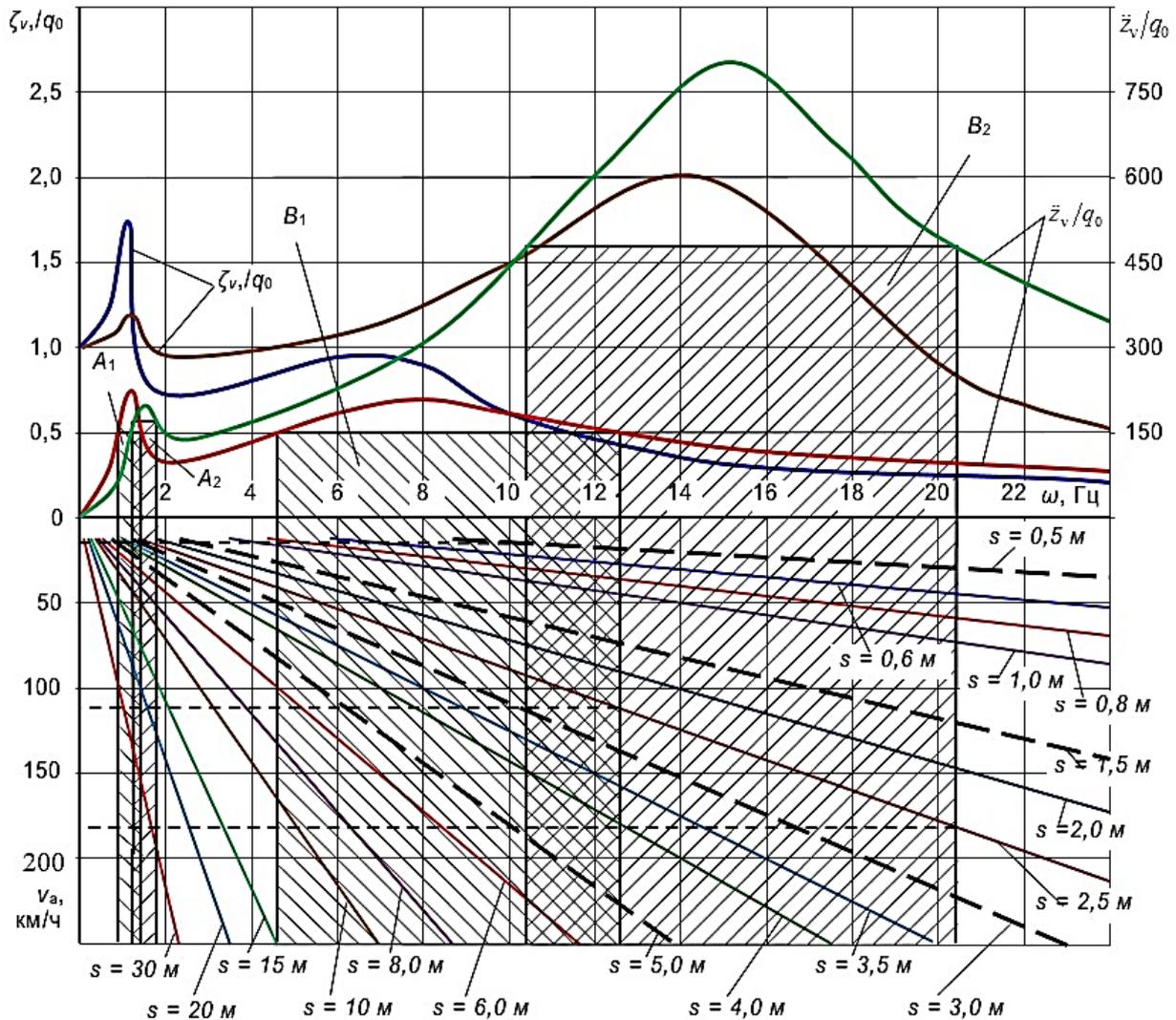
плуатационной документации изготовителей транспортных средств. Каждая установленная на транспортном средстве шина должна отвечать следующим требованиям:

– по размерности соответствовать рекомендациям эксплуатационной документации транспортного средства и размерности колеса, на котором она смонтирована;

– по категории скорости, указанной в нанесенной на шину маркировке, соответствовать или превышать максимальную конструктивную скорость транспортного средства по «Правилам ЕЭК ООН» № 30 [16] или № 54 [17].

– по фактической максимальной массе, приходящейся на шину, не превышать значения, соответствующего индексу несущей способности, указанного в нанесенной на шину маркировке согласно «Правилам ЕЭК ООН» № 30 или № 54.

Однако в настоящее время в большинстве пунктов технического осмотра в Российской Федерации данный регламент игнорируют, кроме того, многие автомобилисты заменяют шины сразу после прохождения технического осмотра. Рейды ГИБДД



**Рис. 5. Амплитудно-частотные характеристики относительных ускорений  $\ddot{z}_v/q_0$  подрессоренной массы и перемещений  $\zeta_v/q_0$  колес (верхняя часть) и зависимости частот колебаний, возбуждаемых неровностями разной длины  $s$  от скорости автомобиля  $v_a$  (нижняя часть):  $A_1$  и  $A_2$  – области низкочастотного резонанса кузова;  $B_1$  и  $B_2$  – области высокочастотного резонанса колес с шинами, установленными изготовителем автомобиля, и сверхнизкопрофильными шинами соответственно**  
**Fig. 5. Amplitude-frequency characteristics of relative accelerations  $\ddot{z}_v/q_0$  of the sprung mass and wheel displacements  $\zeta_v/q_0$  (upper part) and dependences of the vibration frequencies excited by the irregularities of different lengths  $s$  on the vehicle speed  $v_a$  (lower part):  $A_1$  and  $A_2$  are the areas of low-frequency resonance of the body;  $B_1$  and  $B_2$  are the areas of high-frequency resonance of wheels with the tires installed by the car manufacturer and ultra-low-profile tires respectively**

по проверке шин не проводятся, поэтому десятки тысяч автомобилей с «неправильными» шинами эксплуатируются на неровных дорогах Российской Федерации, представляя повышенную опасность, как для себя, так и для других участников движения.

Проблема повышения безопасности

движения автомобиля на основе рационального выбора шин рассматривалась авторами данной статьи в работах [4, 9, 10, 12–15], однако методика повышения безопасности автомобиля путем научно обоснованного выбора серии профиля шин при их замене, которую можно легко применить на практике, не была разработана.



В связи с этим, для повышения безопасности движения автомобилей в стране необходимо разработать методику научно обоснованного выбора серии профиля шин при их замене с учетом состояния подвески

автомобиля и микропрофиля дорог его эксплуатации. Данную методику можно будет применять не только при замене изношенных шин, но и при проектировании новых автомобилей.

### Библиографический список

1. Временные нормы эксплуатационного пробега шин автотранспортных средств: РД 3112199-1085-02: утв. и введ. с 04.04.2002 г. Минтранс РФ. Москва, 2002 г. [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200031302> (26 апреля 2018).
2. Евзович В.Е., Райбман П.Г. Автомобильные шины, диски и ободья. М.: Автополис-плюс, 2010. 144 с.
3. Ротенберг Р.В. Подвеска автомобиля. Колебания и плавность хода. 3-е изд. М.: Машиностроение, 1972. 392 с.
4. Рябов И.М., Чернышов К.В., Гасанов М.М., Мухучев Ш.М. О проблеме безопасности при эксплуатации автомобилей с неисправными амортизаторами // Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия: Наземные транспортные системы. 2014. Т. 9. № 19 (146). С. 103–106.
5. Савельев В.В. Совершенствование автосервиса интенсификацией профилактической стратегии: На примере переднеприводных автомобилей ВАЗ: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.22.10. Волгоград, 2005. 163 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.dslib.net/remont-transporta/sovershenstvovanie-avtoservisa-intensifikaciej-profilakticheskoy-strategii.html>
6. ГОСТ Р 51709-2001. Автотранспортные средства. Требования безопасности к техническому состоянию и методы проверки. Введ. 01.01.2002. М.: Стандартинформ, 2010. 44 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200017699>
7. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности колесных транспортных средств» № ТР ТС 018/2011: Официальный сайт Комиссии таможенного союза [Электронный ресурс]. URL: [www.tsouz.ru](http://www.tsouz.ru); <http://www.eurasiancommission.org/>
8. Хачатуров А.А., Афанасьев Л.В., Васильев В.С. Динамика системы «дорога – шина – автомобиль – водитель». М.: Машиностроение, 1976. 535 с.
9. Рябов И.М., Чернышов К.В., Гасанов М.М., Мухучев Ш.М. Повышение безопасности автомобиля за счет рационального выбора шин с учетом характеристик амортизаторов // Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия: Наземные транспортные системы: межвуз. сб. науч. ст. Волгоград, 2015. Т. 10. № 4 (162). С. 45–49.
10. Рябов И.М., Чернышов К.В., Поздеев А.В., Мухучев Ш.М., Мухидинов Ю.М. Методика определения условий и продолжительности отрывов колес автомобиля от дороги // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2017. № 3(20). С. 36–43.
11. Яценко Н.Н., Прутчиков О.К. Плавность хода грузовых автомобилей. М.: Машиностроение, 1969. 219 с.
12. Поздеев А.В., Похлебин А.В., Чернышов К.В., Мухидинов Ю.М., Мухучев Ш.М. Определение неисправностей гидравлических амортизаторов при стендовых испытаниях // Известия ВолгГТУ. Серия: Наземные транспортные системы. Волгоград, 2015. Т. 12. № 6 (166). С. 71–76.
13. Рябов И.М., Поздеев А.В., Муртузов М.М., Мухучев Ш.М., Мухидинов Ю.М. Особенности формирования нагрузочной характеристики шины // Актуальные вопросы развития транспортной системы: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. (г. Махачкала, 14–15 мая 2015 г.). Махачкала, 2016. С. 37–42.
14. Рябов И.М., Муртузов М.М., Мухидинов Ю.М., Мамакурбанов М.М. Исследование и анализ изменения давления в шинах автомобиля «ГАЗель» на междугороднем маршруте // Известия ВолгГТУ. Серия: Наземные транспортные системы. 2014. № 19 (146). С. 100–102.
15. Рябов И.М., Новиков В.В., Чернышов К.В., Поздеев А.В., Мухучев Ш.М. Гидравлический амортизатор с повышенной эффективностью // Современные железные дороги: достижения, проблемы, образование: материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию Победы в Великой Отечественной войне (г. Волгоград, 26 мая 2015 г.). Волгоград, 2015. Т. 8. С. 125–129.
16. Правила ЕЭК ООН № 30 (легковые шины) [Электронный ресурс]. URL: <http://tyrexpertise.com/ru/spravochnik/ntd/1-eek-oon-30-legkovyeshiny>
17. ГОСТ Р 41.54-99 (Правила ЕЭК ООН № 54) Единые предписания, касающиеся официального утверждения шин для грузовых транспортных средств и их прицепов [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200027110>

### References

1. Vremennyye normy ekspluatatsionnogo probega shin avtotransportnyh sredstv: RD 3112199-1085-02 [Time norms of vehicle tire operational mileage: RD 3112199-1085-02]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200031302> (26 April 2018).
2. Evzovich V.E., Rajbman P.G. *Avtomobil'nye shiny*,



- diski i obod'ya* [Vehicle tires, wheels and rims]. Moscow: Avtopolis-plyus Publ., 2010, 144 p. (In Russian)
3. Rotenberg R.V. *Podveska avtomobilya. Kolebaniya i plavnost' hoda* [Vehicle suspension. Vibrations and running smoothness]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1972, 392 p. (In Russian)
4. Ryabov I.M., Chernyshov K.V., Gasanov M.M., Mухучев Ш.М. On safety problem in operation of vehicles with defective shock absorbers. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Nazemnye transportnye sistemy* [Izvestia VSTU. Series Ground transport systems], 2014, vol. 9, 19 (146), pp. 103–106. (In Russian)
5. Savel'ev V.V. *Sovershenstvovanie avtoservisa intensifikacii profilakticheskoi strategii: Na primere peredneprivodnykh avtomobilej VAZ* [Vehicle maintenance improvement by preventive strategy intensification: On example of front-wheel-drive VAZ vehicles]. Available at: <http://www.dslib.net/remont-transporta/sovershenstvovanie-avtoservisa-intensifikacii-profilakticheskoi-strategii.html>
6. GOST R 51709-2001. *Avtotransportnye sredstva. Trebovaniya bezopasnosti k tekhnicheskomu sostoyaniyu i metody proverki* [Motor vehicles. Safety requirements for technical condition and testing methods]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200017699> (26 April 2018).
7. *Tekhnicheskij reglament Tamozhennogo soyuza «O bezopasnosti kolesnykh trans-portnykh sredstv»* [Technical Regulations of the Customs Union "On the safety of wheeled vehicles" No. TR TS 018/2011: Official website of the Commission of the Customs Union]. URL: [www.tsouz.ru](http://www.tsouz.ru); <http://www.eurasiancommission.org/> (26 April 2018).
8. Hachaturov A.A., Afanas'ev L.V., Vasil'ev V.S. *Dinamika sistemy «doroga – shina – avtomobil' – voditel'»* [Dynamics of the system "road – tire – vehicle – driver"]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1976, 535 p. (In Russian)
9. Ryabov I.M., Chernyshov K.V., Gasanov M.M., Mухучев Ш.М. Improving vehicle safety through the rational choice of tires considering shock absorber characteristics. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Izvestia VSTU. Series Ground transport systems]. Volgograd, 2015, vol. 10, no. 4 (162), pp. 45–49. (In Russian)
10. Ryabov I.M., Chernyshov K.V., Pozdeev A.V., Mухучев Ш.М., Muhidinov Yu.M. The method of determining the conditions and duration of the breaks of the

#### Критерии авторства

Рябов И.М., Чернышов К.В., Поздеев А.В., Мухучев Ш.М., Мухидинов Ю.М. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

- wheels of the car off the road. *Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport* [Energy and Resource Saving: Industry and Transport]. 2017, no. 3(20), pp. 36–43. (In Russian)
11. Yacenko N.N., Prutchikov O.K. *Plavnost' hoda gruzovykh avtomobilej* [Smooth running of trucks]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1969, 219 p. (In Russian)
12. Pozdeev A.V., Pohlebin A.V., Chernyshov K.V., Muhidinov Yu.M., Mухучев Ш.М. Fault detection of hydraulic shock absorbers under test bench testing. *Izvestiya VolgGTU. Nazemnye transportnye sistemy* [Izvestia VSTU. Series Ground transport systems], 2015, vol. 12, no. 6 (166), pp. 71–76. (In Russian)
13. Ryabov I.M., Pozdeev A.V., Murtuzov M.M., Mухучев Ш.М., Muhidinov Yu.M. *Osobennosti formirovaniya nagruzochnoi karakteristiki shiny* [Formation features of tire load characteristics]. *Aktual'nye voprosy razvitiya transportnoj sistemy: sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoi konferencii* [Actual issues of transport system development: collection of scientific works of the International scientific and practical conference, Makhachkala, 14–15 May 2015]. Makhachkala, 2016, pp. 37–42. (In Russian)
14. Ryabov I.M., Murtuzov M.M., Muhidinov Yu.M., Mamakurbanov M.M. Research and analysis of pressure variations in Gazel tires on a long-distance route. *Izvestiya VolgGTU. Nazemnye transportnye sistemy* [Izvestia VSTU. Series Ground transport systems], 2014, no. 19 (146), C. 100–102. (In Russian)
15. Ryabov I.M., Novikov V.V., Chernyshov K.V., Pozdeev A.V., Mухучев Ш.М. Hydraulic shock absorber with increased efficiency. *Materialy VIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoi konferencii, posvyashch. 70-letiyu Pobedy v Velikoj Otechestvennoj vojne "Sovremennye zheleznye dorogi: dostizheniya, problemy, obrazovanie"* [Proceedings of VIII International scientific and practical conference dedicated to the 70th anniversary of the Victory in the Great Patriotic War "Modern railways: achievements, problems, formation"]. Volgograd, 2015, vol. 8, pp. 125–129. (In Russian)
16. *legkovye shiny* [Passenger car tires]. URL: <http://tyreexpertise.com/ru/spravochnik/ntd/1-eek-oon-30-legkovye-shiny> (26 April 2018).
17. *Edinobraznye predpisaniya, kasayushchiesya oficial'nogo utverzhdeniya shin dlya gruzovykh transportnykh sredstv i ih pricepov* [Uniform regulations concerning the official approval of tires for trucks and their trailers]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200027110> (26 April 2018).

#### Authorship criteria

Ryabov I.M., Chernyshov K.V., Pozdeev A.V., Mухучев Ш.М., Mухидинов Ю.М. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

#### Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.



Оригинальная статья / Original article

УДК 629.3.018.2

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-10-239-247>

## ЭМПИРИЧЕСКИЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ САЙЛЕНТ-БЛОКОВ ПОДВЕСКИ АВТОТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

А.И. Федотов<sup>1</sup>, Д.А. Тихов-Тинников<sup>2</sup>, В.С. Барадиев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

<sup>2,3</sup>Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления 670013, Российская Федерация, Республика Бурятия, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40 В/1.

**РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ.** Получение экспериментальных данных для разработки математических моделей функционирования сайлент-блоков подвески автомобиля с целью разработки метода их диагностирования. Объектом исследования является процесс функционирования сайлент-блока подвески автомобиля. **МЕТОДЫ.** Испытания выполнены в научно-исследовательской лаборатории кафедры «Автомобили» Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления. Использовался стенд, реализующий режим статического и динамического нагружения. Диапазон частоты колебаний рычага с испытуемыми сайлент-блоками был задан в диапазоне от 0 до 1,67 Гц. В процессе испытаний проверялись сайлент-блоки с различным техническим состоянием, как новые, так и из потока отказов транспортных средств, находящихся в эксплуатации. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Получены силовые характеристики сайлент-блоков легкового автомобиля в динамическом режиме. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Разрабатываемый метод диагностирования на основании полученных экспериментальных данных позволит объективно определять техническое состояние сайлент-блоков подвески автомобиля. Также применение метода на практике позволит значительно сократить трудоемкость диагностических работ.

**Ключевые слова:** подвеска, сайлент-блок, экспериментальное оборудование, диагностика, колесное транспортное средство.

**Информация о статье.** Дата поступления 05 июня 2018 г.; дата принятия к печати 25 сентября 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 октября 2018 г.

**Формат цитирования.** Федотов А.И., Тихов-Тинников Д.А., Барадиев В.С. Эмпирические и теоретические предпосылки математической модели процесса функционирования сайлент-блоков подвески АТС // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 10. С. 239–247. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-239-247

## EMPIRICAL AND THEORETICAL BASES OF THE MATHEMATICAL MODEL OF VEHICLE SUSPENSION SILENT BLOCKS OPERATION

A.I. Fedotov, D.A. Tikhov-Tinnikov, V.S. Baradiev

Irkutsk National Research Technical University  
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation  
East Siberian State University of Technology and Management  
40 B/1, Klyuchevskaya St., Ulan-Ude, 670013, Russian Federation

<sup>1</sup>Федотов Александр Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автомобильного транспорта, e-mail: [fai@istu.edu](mailto:fai@istu.edu)

Alexander I. Fedotov, Doctor of technical sciences, Professor, Head of the Department of Motor Transport, e-mail: [fai@istu.edu](mailto:fai@istu.edu)

<sup>2</sup>Тихов-Тинников Дмитрий Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автомобилей, e-mail: [dm\\_tt@mail.ru](mailto:dm_tt@mail.ru)

Dmitry A. Tikhov-Tinnikov, Candidate of technical sciences, Associate Professor, Head of the Motor Car Department, e-mail: [dm\\_tt@mail.ru](mailto:dm_tt@mail.ru)

<sup>3</sup>Барадиев Виктор Сергеевич, ассистент кафедры автомобилей, e-mail: [vsgutu-ka@mail.ru](mailto:vsgutu-ka@mail.ru)  
Viktor S. Baradiev, Assistant Professor of the Motor Car Department, e-mail: [vsgutu-ka@mail.ru](mailto:vsgutu-ka@mail.ru)



**ABSTRACT.** The **PURPOSE** of the work is to obtain experimental data for the development of mathematical models of vehicle suspension silent blocks operation to develop a method for their diagnosis. The object of the study is the operation process of a vehicle suspension silent block. **METHODS.** The tests were performed in the research laboratory of the Motor Car Department of the East Siberian State University of Technology and Management. A test bench implementing the mode of static and dynamic loading was used. The frequency range of the lever with the tested silent blocks was set in the range from 0 to 1.67 Hz. The silent blocks of different technical conditions, both new and those from the failure flow of vehicles in operation were subjected to the tests. **RESULTS.** Power characteristics of silent blocks of a vehicle in a dynamic mode have been received. **CONCLUSION.** The developed diagnosis method based on the obtained experimental data will allow an objective determination of the technical condition of vehicle suspension silent blocks. Also, the application of the method in practice will significantly reduce the complexity of diagnostic work.

**Key words:** suspension, silent block, experimental equipment, diagnostics, wheeled vehicle

**Information about the article.** Received June 05, 2018; accepted for publication September 25, 2018; available online October 31, 2018.

**For citation.** Fedotov A.I., Tikhov-Tinnikov D.A., Baradiev V.S. Empirical and theoretical bases of the mathematical model of vehicle suspension silent blocks operation. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 10, pp. 239–247. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-239-247. (In Russian).

## Введение

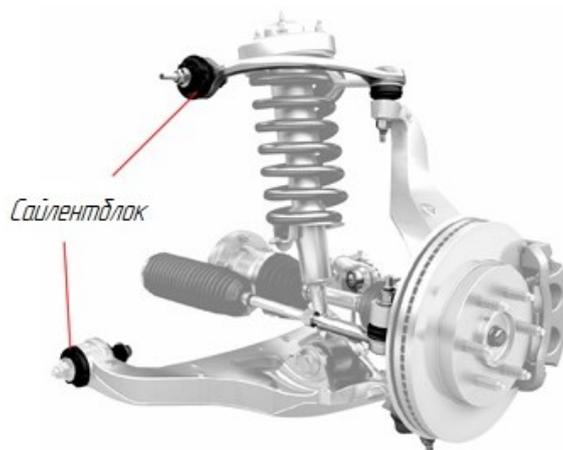
Дорожная безопасность транспортного средства во многом определяется надежностью элементов подвески. В связи с этим определение технического состояния подвески в условиях эксплуатации является в настоящее время одной из актуальных задач технической диагностики. Любая подвеска транспортного средства включает множество деталей, что усложняет проведение ее диагностирования, а также требует высокой квалификации персонала и специального оборудования. Зачастую выявление неисправностей подвески осуществляется не по диагностическим, а по структурным параметрам технического состояния, определяемым в ходе разборки и дефектации ее деталей. В процессе эксплуатации автотранспортного средства (АТС) также могут возникать дефекты подвески, которые при движении на небольших и средних скоростях не воспринимаются водителем. Данное обстоятельство делает обнаружение таких дефектов практически невозможным. При движении в более сложных условиях, например, при повороте на высокой скорости такие неисправности могут привести к внезапному отказу подвески. Выход из строя любого элемента подвески может снизить эффективность эксплуатации и напрямую сказаться на активной безопасности автомобиля [1–3].

В настоящее время подвески с поперечными рычагами применяются на многих легковых транспортных средствах. Характерной особенностью рычажных подвесок такого типа является установка рычагов на сайлент-блоках (рис. 1).

В отличие от остальных элементов подвески, допускающих определение технического состояния органолептическими методами, сайлент-блоки требуют более тщательного исследования, в том числе и с использованием технических средств диагностирования. Характеристики сайлент-блоков отличаются большой чувствительностью к отклонениям, возникающим при их монтаже, а также нарушением правил эксплуатации, например, движение автомобиля с большой скоростью по разбитой дороге.

Основное назначение сайлент-блоков – снижение вибраций и ударных нагрузок, передаваемых на кузов, при этом в конструкцию современных сайлент-блоков закладывается влияние и на кинематику подвески.

Сайлент-блок, применяемый в поперечных рычагах, состоит из двух соосно расположенных цилиндрических обойм, пространство между которыми заполнено полимером методом сильного обжатия или вулканизации (рис. 2).



**Рис. 1. Сайлент-блоки в поперечных рычагах подвески**  
**Fig. 1. Silent blocks in the suspension wishbone**

Сайлент-блок сдерживает значительные деформации, действующие в разных плоскостях и направлениях. Именно на сайлент-блок приходится огромная доля ударных нагрузок, получаемых автомобильной подвеской. Помимо этого, он обеспечивает радиальную, угловую и осевую податливость (рис. 2).

В процессе эксплуатации материал сайлент-блока подвергается релаксации, вследствие чего происходит осевое смещение внутренней обоймы относительно резинового материала (рис. 3). Указанное явление приводит к изменению силовой характеристики и кинематики подвески (рис. 4), что сказывается на устойчивости и управляемости транспортного средства, следовательно, оно влияет на безопасность его движения.

Чтобы определить техническое состояние сайлент-блоков и выявить на ранней стадии будущей отказ, необходим объективный метод диагностирования с использованием соответствующего технологического оборудования<sup>4,5</sup> [4]. Разработка метода и реализующего его оборудования, а

также проведение дальнейших теоретических исследований основывается на результатах экспериментов, направленных на получение эмпирических силовых характеристик работоспособных и неработоспособных сайлент-блоков.

Экспериментальное исследование проводилось на специально разработанном стенде в научно-исследовательской лаборатории кафедры «Автомобили» Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления. Стент-блок позволяет имитировать колебание рычага подвески, изменять частоту колебаний. Измерительная система комплекса позволяет получать опытные характеристики испытуемых сайлент-блоков [5].

В ходе экспериментов исследовались сайлент-блоки марки OEM 2101-2904043 автомобилей семейства ВАЗ. Для определения силовой характеристики объекта с исправным техническим состоянием было испытано сорок новых сайлент-блоков, экспериментальные данные которых были усреднены.

<sup>4</sup>Ле Ван Луан Диагностика тормозных систем АТС на основе измерения сил в пятнах контакта колес с беговыми барабанами стенда: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.22.10. Иркутск, 2015. 20 с. / Le Van Luan Diagnostics of vehicle brake systems based on the measurement of forces in the contact patches of wheels and test bench chassis dynamometers: the Author's Abstract of the Candidate's Dissertation in technical sciences: 05.22.10. Irkutsk, 2015. 20 p.

<sup>5</sup>Халезов В.П. Повышение информативности дорожного метода диагностики тормозных систем автотранспортных средств в условиях эксплуатации: дис. канд. техн. наук: 05.22.10. Иркутск, 2015. 20 с. / Khalezov V.P. Increasing the informative value of the road method of vehicle brake system diagnosis when in operation: Candidate's Dissertation in technical sciences: 05.22.10. Irkutsk, 2015. 20p.

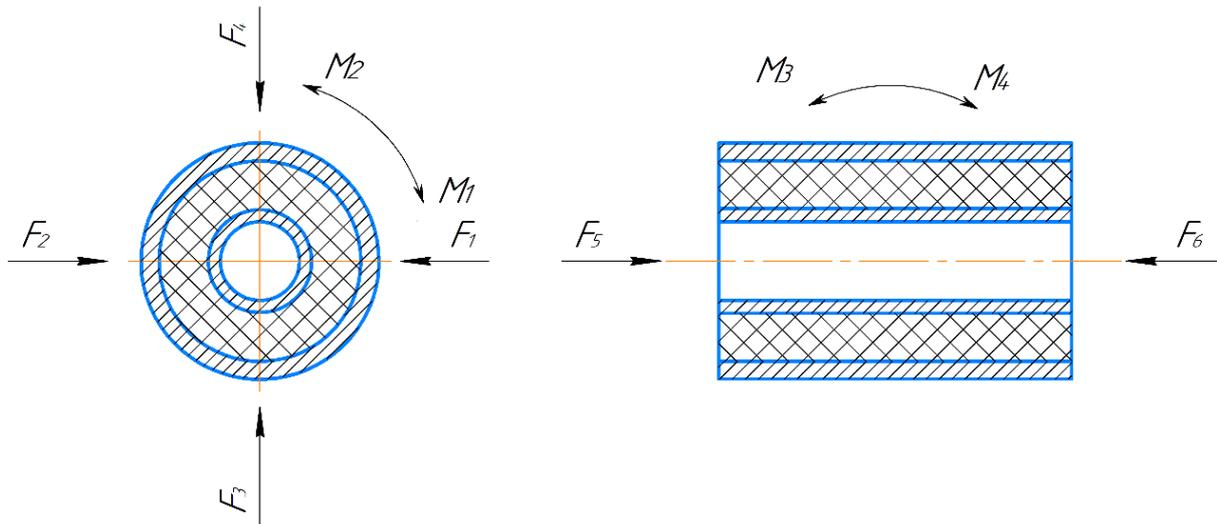


Рис. 2. Структурная схема сайлент-блока  
Fig. 2. Schematic diagram of a silent block

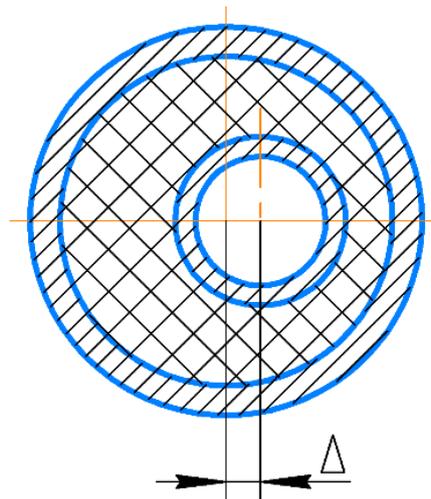


Рис. 3. Осевое смещение обоймы сайлент-блока  
Fig. 3. Axial displacement of the silent block cage

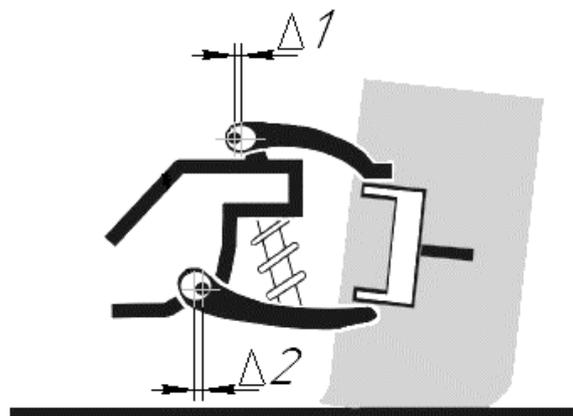


Рис. 4. Нарушение кинематики подвески при изменении технического состояния сайлент-блоков  
Fig. 4. Failure of suspension kinematics when changing the technical condition of silent blocks



Аналогичные характеристики были получены для объектов с измененным техническим состоянием, а также для неисправных сайлент-блоков (рис. 5). Регистрировались процессы изменения усилия на рычаге ( $F, H$ ) при его перемещении ( $S, m$ ).

Полученные данные в процессе обработки разложены в ряды Фурье [6], что позволило представить экспериментальный сигнал в виде амплитудного и фазового спектра. Далее, используя процедуру «синтез Фурье», по наиболее значимым ампли-

туда были получены аналитические выражения для описания средних силовых характеристик испытуемых сайлент-блоков. Для синтеза сигнала перемещения достаточно пяти гармоник, для сигнала усилия – пятнадцати гармоник. Синтез сигнала проводится по следующему выражению (1):

$$S = \frac{A_0}{2} + \sum_{i=1}^n A_n \cos(n\omega t + \varphi_n), \quad (1)$$

где  $S$  – синтезируемый сигнал;  $A$  – амплитуда;  $\varphi_n$  – фаза  $n$ -й гармоники;  $\omega$  – частота.

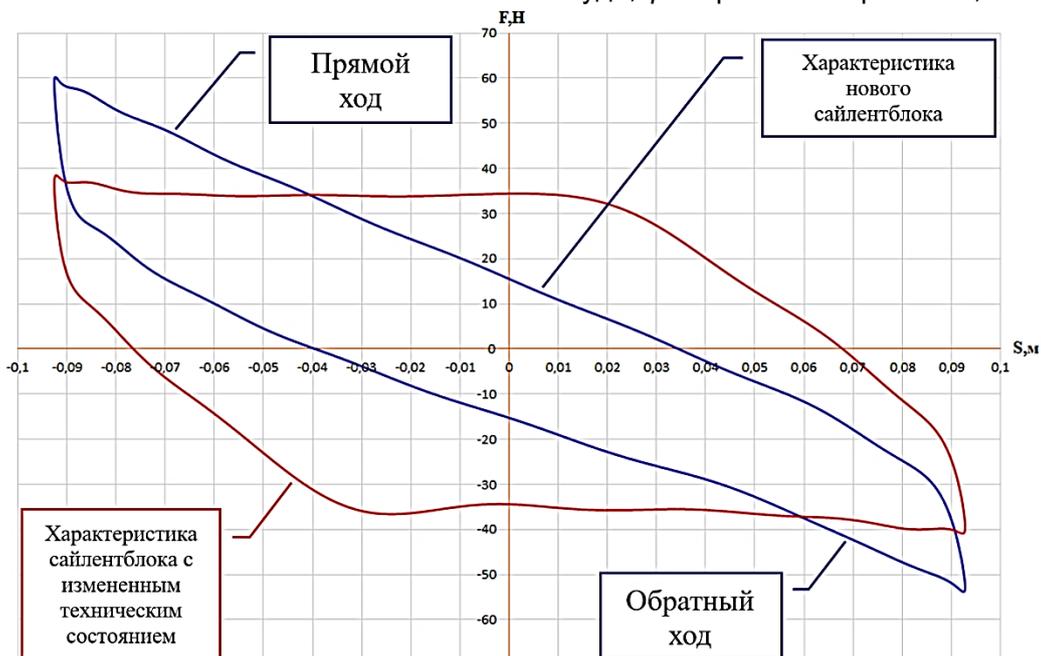


Рис. 5. Усредненное значение экспериментальных данных  
Fig. 5. Average value of the experimental data

Результаты выполненных экспериментальных исследований являются эмпирической основой для разработки математической модели функционирования сайлент-блока в целях его диагностирования. Математическая модель для описания работы исправного сайлент-блока может быть построена на основе общепринятых теоретических моделей, описывающих работу полимеров [7, 8].

Первоначально за основу модели взята классическая модель Максвелла, состоящая из упругого элемента и демпфера, описывающая изменение усилия  $F_b$ , развиваемого сайлент-блоком от его деформации, согласно выражению:

$$F_b = (C_x * S_{pex} + K_D * \dot{S}_{pex}), \quad (2)$$

где:  $C_x$  – жесткость упругого элемента;  $S_{pex}$  – деформация [м];  $K_D$  – коэффициент демпфирования;  $\dot{S}_{pex}$  – скорость деформации [м/с].

Результаты расчетов с использованием выражения (2) показали, что модель Максвелла хорошо описывает возникающий при работе сайлент-блока гистерезис, но получаемая при этом характеристика имеет форму симметричного эллипса, что не соответствует полученным экспериментальным характеристикам, которые несимметричны относительно центральной оси (рис. 5). Из



механики полимеров известно, что в случае несимметричности характеристики в состав модели необходимо ввести дополнительный элемент, характеризующий внутреннее трение, возникающее между молекулами

упругого материала. Таким образом, модель исправного сайлент-блока может быть представлена в виде совокупности трех элементов: упругого, демпфирующего и трения (рис. 6).

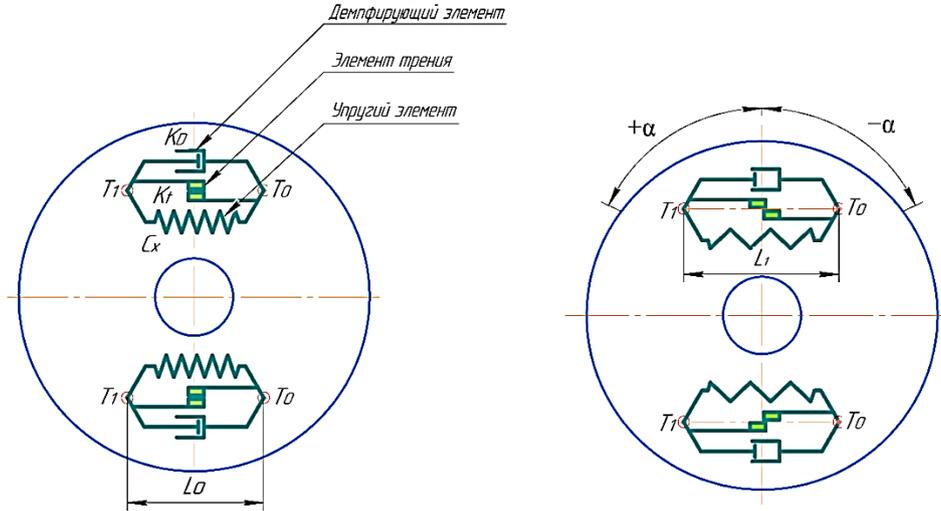


Рис. 6. Схема математической модели  
Fig. 6. Diagram of the mathematical model

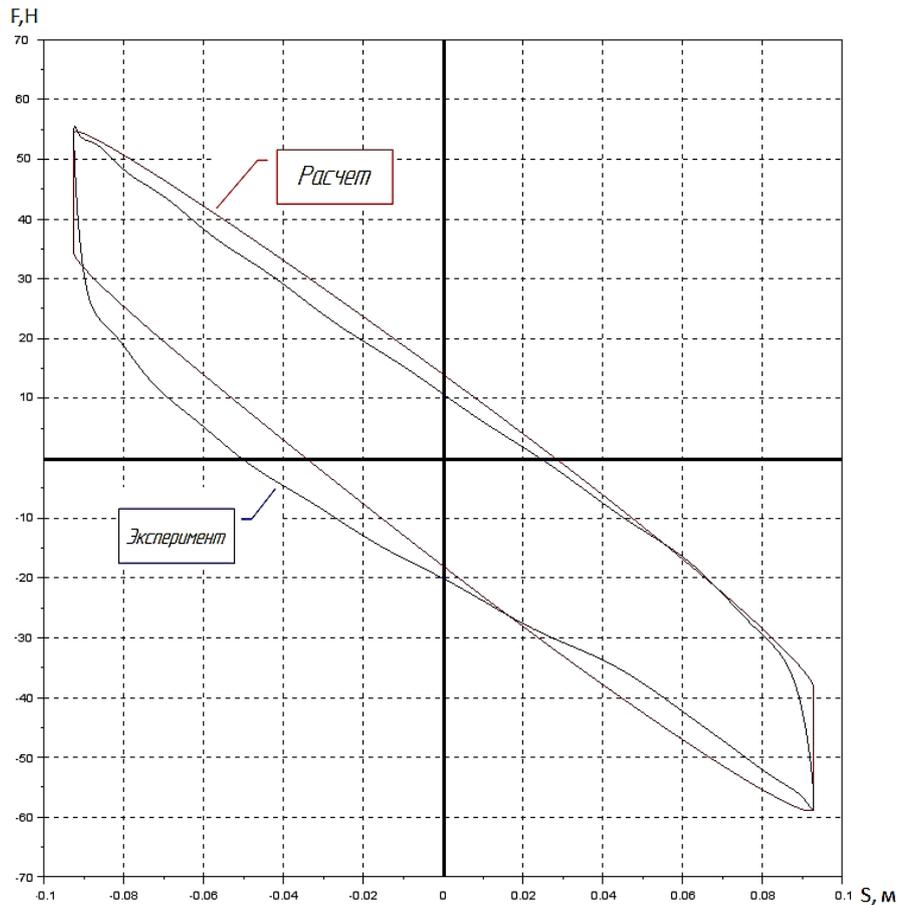


Рис. 7. Силовая характеристика сайлент-блока  
Fig. 7. Power characteristic of a silent block



В данном случае математическая модель процесса функционирования сайлент-блока имеет следующий вид (3):

$$F_b = \left( C_x * S_{pex} + K_D * \dot{S}_{pex} + K_t * \text{sign}(\dot{S}_{pex}) \right), \quad (3)$$

где:  $C_x$  – жесткость упругого элемента;  $S_{pex}$  – деформация [м];  $K_D$  – коэффициент демпфирования;  $\dot{S}_{pex}$  – скорость деформации [м/с];  $K_t$  – коэффициент трения;  $\text{sign}$  – кусочно-постоянная функция.

### Заключение

Для более точного описания результатов экспериментов с использованием представленной модели потребуется определить функции, характеризующие изменения коэффициентов  $K_D$  и  $K_t$  от скорости деформации полимера  $\dot{S}_{pex}$ . В случае моделирования неисправного объекта модель должна учитывать дополнительное трение, возникающее в местах разрыва полимера, а также трение между втулкой и упругим материалом сайлент-блока.

Решая представленное уравнение (3), получены расчетные зависимости изменения усилия на рычаге ( $F$ ,  $H$ ) при его перемещении ( $S$ ,  $m$ ). Сравнение полученных зависимостей с экспериментальными данными (рис. 7) показывает, что в данном виде модель достаточно хорошо описывает изменение усилия при его перемещении, но при этом имеются количественные различия между расчетом и экспериментом. При этом следует отметить, что качественный характер расчетных значений схож с экспериментальными данными.

Таким образом, данная математическая модель после доработки может быть использована для описания процесса функционирования сайлент-блока в подвеске автомобиля в диагностическом режиме, а также для выполнения теоретических исследований по определению влияния технического состояния резинометаллических шарниров подвески АТС на устойчивость и управляемость его движения [9–14].

### Библиографический список

1. Бойко А.В., Халезов В.П., Яньков О.С., Марков А.С. Комплекс для измерения нормальных и касательных реакций, распределенных по длине пятна контакта эластичной шины с плоской опорной поверхностью // Автомобиль для Сибири и Крайнего Севера: Конструкция, эксплуатация, экономика: материалы 90-й Международ. науч.-техн. конф. Ассоциации автомобильных инженеров в ИРНИТУ (г. Иркутск, 9–10 апреля 2015 г.). Иркутск, 2015. С. 102–110.
2. Федотов А.И., Лысенко А.В., Тихов-Тинников Д.А. Контроль технического состояния подвески автомобилей в условиях эксплуатации методом движения по окружности // Автомобиль для Сибири и Крайнего Севера: конструкция, эксплуатация, экономика: материалы 90-й Международ. науч.-техн. конф. Ассоциации автомобильных инженеров в ИРНИТУ (г. Иркутск, 9–10 апреля 2015 г.). Иркутск, 2015. С. 232–238.
3. Мигаль В.Д., Мигаль В.П. Методы технической диагностики автомобилей. Харьков: Изд-во Форум, 2014. 416 с.
4. Бородин А.Л., Васильев В.И., Шарыпов А.В., Черепанов А.П. Разработка метода диагностирования

- гидравлических тормозных систем автотранспортных средств на режимах служебного торможения // Вестник Курганской ГСХА. 2015. № 4 (16). С. 29–32.
5. Федотов А.И., Тихов-Тинников Д.А., Барадиев В.С. Оборудование для экспериментального определения силовых характеристик автомобильных сайлент-блоков // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. № 8 (115). С. 176–181. <https://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2016-8-176-181> (дата обращения: 25.05.2018).
6. Барадиев В.С., Тихов-Тинников Д.А. Экспериментальное исследование силовых характеристик автомобильных сайлент-блоков // Безопасность колесных транспортных средств в условиях эксплуатации: материалы 99-й Международ. науч.-техн. конф. Ассоциации автомобильных инженеров в ИРНИТУ (г. Иркутск, 20–22 апреля 2017 г.) Иркутск, 2017. С. 12–20.
7. Гольберг И.И. Механическое поведение полимерных материалов (математическое описание). М.: Изд-во Химия, 1970. 192 с.
8. Кулезнев В.Н. Основы физики и химии полимеров. М.: Высшая школа, 1977. 248 с.



9. Fedotov A. I., Tikhov-Tinnikov D. A., Ovchinnikova N. I., Lysenko A.V. Simulation of car movement along circular path. On-line journal «IOP Conference Series: Earth and Environmental Science». 2017, Sci. 87 082018 [Электронный ресурс]. URL: <http://iop-science.iop.org/article/10.1088/1755-1315/87/8/082018/pdf>. DOI: 10.1088/1755-1315/87/8/082018 (дата обращения: 02.04.2018).
10. Федотов А.И., Бойко А.В. Математическое моделирование процессов функционирования автомобилей. Иркутск: Изд-во Иркутского государственного технического университета, 2012. 113 с.
11. Ryabov I.V., Novikov V.V., Pozdeev A.V. Efficiency of shock absorber in vehicle suspension. Online journal «Procedia Engineering». 2016. Vol. 150. P. 354–362. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187770581631270X> (дата обращения: 25.05.2018).
12. Ryabov I.M., Novikov V.V., Pozdeev A.V. Vibroprotective and Energetic Properties of Vehicle Suspension with Pendular Damping in a Single-Mass Oscillating Sys-

- tem. On-line journal «Procedia Engineering». 2017. Vol. 2016. P. 519–526. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817351937> (дата обращения: 25.05.2018).
13. Fedotov A.I., Zedgenizov V.G., Ovchinnikova N.I. Dynamic analysis of elastic rubber tired car wheel breaking under variable normal load To cite this article: et al 2017 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 87 082017 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 87 (2017) 08 2017. DOI:10.1088/1755-1315/87/8/082017 [Электронный вариант]. URL: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56341065000> (дата обращения: 25.05.2018).
14. Fedotov A.I., Zedgenizov V.G., Ovchinnikova N.I. Experimental studies of breaking of elastic tired wheel under variable normal load To cite this article: 2017 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 87 082019 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 87 (2017) 082019. DOI: 10.1088/1755-1315/87/8/082019 Available at: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56341065000> (дата обращения: 25.05.2018).

### References

1. Boiko A.V., Halezov V. P., Yan'kov, O. S., Markov A. S. *Kompleks dlya izmereniya normal'nyh i kasatel'nyh reakcij, raspredelennyh po dline pyatna kontakta ehlastichnoj shiny s ploskoj opornoj poverhnost'yu* [Complex for measuring normal and tangential reactions distributed along the contact patch length of an elastic flat tyre]. *Materialy 90-j Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii Asociacii avtomobil'nyh inzhenerov v IRNITU "Avtomobil' dlya Sibiri i Krajnego Severa: Konstrukciya, ehkspluataciya, ehkonomika"* [Materials of the 90th International scientific and technical conference of the Association of automotive engineers in IRNITU "Vehicles for Siberia and the Far North: Design, Operation, Economy", Irkutsk, 9–10 April 2015]. Irkutsk, 2015, pp. 102–110. (In Russian).
2. Fedotov A.I., Lysenko A.V., Tikhov-Tinnikov D.A. *Kontrol' tekhnicheskogo sostoyaniya podveski avtomobilej v usloviyah ehkspluatacii metodom dvizheniya po okruzhnosti* [Control of vehicle suspension technical condition when in operation by the method of circular motion]. *Materialy 90-j Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii Asociacii avtomobil'nyh inzhenerov v IRNITU "Avtomobil' dlya Sibiri i Krajnego Severa: Konstrukciya, ehkspluataciya, ehkonomika"* [Materials of the 90th International scientific and technical conference of the Association of automotive engineers in IRNITU "Vehicles for Siberia and the Far North: Design, Operation, Economy", Irkutsk, 9–10 April 2015]. Irkutsk, 2015, pp. 232–238. (In Russian).
3. Migal V.D., Migal V.P. *Metody tekhnicheskoy diagnostiki avtomobilej* [Methods of vehicle technical diagnostics]. Kharkov: Forum Publ., 2014, 416 p. (In Russian).
4. Borodin, A. L., Vasilyev V. I. Sharypov A. V., Cherepanov A. P. *Razrabotka metoda diagnostirovaniya gidravlicheskih tormoznyh sistem avtotransportnyh*

- sredstv na rezhimah sluzhebnogo tormozheniya* [Development of a method for diagnosing hydraulic brake systems of vehicles in service braking modes]. *Vestnik Kurganskoy GSKHA [Bulletin of Kurgan state agricultural Academy]*, 2015, vol. 16, no. 4, pp. 29–32. (In Russian).
5. Fedotov A.I., Tikhov-Tinnikov D.A., Baradiev V.S. *Oborudovanie dlya ehksperimental'nogo opredeleniya silovyh karakteristik avtomobil'nyh sajlentblokov* [Equipment for experimental determination of vehicle silent block power characteristics]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk state technical University], 2016, vol. 115, no. 8, pp. 176–181. <https://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2016-8-176-181>. (In Russian).
6. Baradiev V.S., Tikhov-Tinnikov D.A. *Eksperimental'noe issledovanie silovyh karakteristik avtomobil'nyh sajlentblokov* [Experimental study of automotive silent block power characteristics]. *Materialy 99-j Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii Asociacii avtomobil'nyh inzhenerov v IRNITU "Bezopasnost' kolyosnyh transportnyh sredstv v usloviyah ehkspluatacii"* [Materials of the 90th International scientific and technical conference of the Association of automotive engineers in IRNITU "Safety of wheeled vehicles in operation", Irkutsk, 20–22 April 2017]. Irkutsk, 2017, pp. 12–20. (In Russian).
7. Goldberg I.I. *Mekhanicheskoe povedenie polimernyh materialov (matematicheskoe opisaniye)* [Mechanical behavior of polymer materials (mathematical description)]. Moscow: Chemistry Publ., 1970, 192 p. (In Russian).
8. Kuleznev V.N. *Osnovy fiziki i himii polimerov* [Basic of physics and chemistry of polymers]. Moscow: Higher school Publ., 1977, 248 p. (In Russian).
9. Fedotov A.I., Tikhov-Tinnikov D.A., Ovchinnikova N.I., Lysenko A.V. Simulation of car movement along circular path. On-line journal «IOP Conference Series: Earth and



Environmental Science». 2017, Sci. 87 082018. Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/87/8/082018/pdf>. DOI :10.1088/1755-1315/87/8/082018. (accessed 2 April 2018).

10. Fedotov A. I., Boiko A. V. *Matematicheskoe modelirovanie processov funkcionirovaniya avtomobilej* [Mathematical modeling of vehicle operation processes]. Irkutsk: ISTU Publ., 2012, 114 p. (In Russian).

11. Ryabov I.V., Novikov V.V., Pozdeev A.V. Efficiency of shock absorber in vehicle suspension. On-line journal «Procedia Engineering». 2016, vol. 150, pp. 354–362. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187770581631270X>. (accessed 25 May 2018).

12. Ryabov I.M., Novikov V.V., Pozdeev A.V. Vibroprotective and Energetic Properties of Vehicle Suspension with Pendular Damping in a Single-Mass Oscillating System. On-line journal «Procedia Engineering». 2017, vol.

2016, pp. 519–526. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817351937>. (accessed 25 May 2018).

13. Fedotov A.I., Zedgenizov V.G., Ovchinnikova N.I. Dynamic analysis of elastic rubber tired car wheel breaking under variable normal load To cite this article: et al 2017 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 87 08 2017 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 87 (2017) 082017. DOI: 10.1088/1755-1315/87/8/082017. Available at: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56341065000>. (accessed 25 May 2018).

14. Fedotov A.I., Zedgenizov V.G., Ovchinnikova N.I. Experimental studies of breaking of elastic tired wheel under variable normal load To cite this article: 2017 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 87 082019 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 87 (2017) 082019. DOI: 10.1088/1755-1315/87/8/082019 Available at: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56341065000>. (accessed 25 May 2018).

#### Критерии авторства

Федотов А.И., Тихов-Тинников Д.А., Барадиев В.С. совместно получили экспериментальные данные для разработки математических моделей функционирования сайлент-блоков подвески автомобиля с целью разработки метода их диагностирования, а также подготовили рукопись. Несут ответственность за плагиат.

#### Authorship criteria

Fedotov A.I., Tikhov-Tinnikov D.A., Baradiev V.S. in cooperation received experimental data for the development of mathematical models of vehicle suspension silent blocks operation in order to develop a method of their diagnosis and prepared the manuscript as well. They are responsible for plagiarism.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.



Оригинальная статья / Original article

УДК 629.331

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-10-248-256>

## ИНТЕГРИРОВАННЫЙ ЛОГИСТИЧЕСКИЙ МЕНЕДЖМЕНТ НА ОСНОВЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАШИН

© Г.Г. Ядрошникова<sup>1</sup>, О.А. Шаламова<sup>2</sup>, Е.В. Самойлова<sup>3</sup>, Е.О. Юркова<sup>4</sup>

Сибирский государственный университет путей сообщения,  
630049, Российская Федерация, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191.

**РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ.** В работе оценена степень влияния различных факторов, обуславливающих значительные трудности в планировании технической и производственной эксплуатации машин, на фактическое техническое состояние техники. **МЕТОДЫ.** Для восполнения дефицита информации в процессе управления эксплуатацией транспортно-технологических комплексов и принятия решений по достижению запланированного уровня технической готовности машин применен экспертный метод, который позволил построить априорное ранжирование факторов, оказывающих наиболее значимое влияние в процессе управления сложными техническими системами. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** По отказам узлов и систем путевых машин класса «снегоуборочных машин», из данных Западно-Сибирской железной дороги, построены диаграммы Парето и Исикавы, проанализированы причины возникновения отказов методом «5 почему». На основании мнений экспертов проранжировано восемь факторов, которые могли быть первопричиной возникновения отказов, определены отклонения суммы рангов от их средней суммы, удельные веса и занимаемое место факторов по степени их значимости, рассчитана дисперсия и построена априорная диаграмма рангов. Значение коэффициента конкордации  $W = 0,876$  говорит о высокой степени согласованности мнений экспертов, что является подтверждением статистической достоверности используемых в исследовании материалов. **ВЫВОДЫ.** Для предупреждения отказа отдельных узлов и систем путевых машин класса «снегоуборочных машин» определен ряд мероприятий, направленный на улучшение организации технической эксплуатации этих машин.

**Ключевые слова:** транспортно-технологические комплексы, техническое состояние, экспертный метод, отказы, факторный анализ отказов.

**Информация о статье.** Дата поступления 18 июля 2018 г.; дата принятия к печати 19 сентября 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 октября 2018 г.

**Формат цитирования.** Ядрошникова Г.Г., Шаламова О.А., Самойлова Е.В., Юркова Е.О. Интегрированный логистический менеджмент на основе многокритериальной оценки технического состояния машин // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 10. С. 248–256. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-248-256

<sup>1</sup>Ядрошникова Галина Григорьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии транспортного машиностроения и эксплуатации машин, e-mail: galinattm@bk.ru

Galina G. Yadroshnikova, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Technology of Transport Engineering and Machine Operation, e-mail: galinattm@bk.ru

<sup>2</sup>Шаламова Оксана Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии транспортного машиностроения и эксплуатации машин, e-mail: oksana.sh73@mail.ru

Oksana A. Shalamova, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Technology of Transport Engineering and Machine Operation, e-mail: oksana.sh73@mail.ru

<sup>3</sup>Самойлова Елена Владимировна, кандидат экономических наук, доцент кафедры технологии транспортного машиностроения и эксплуатации машин, e-mail: nemez007@mail.ru

Elena V. Samoilova, Candidate of Economics, Associate Professor of the Department of Technology of Transport Engineering and Machine Operation, e-mail: nemez007@mail.ru

<sup>4</sup>Юркова Елена Олеговна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии транспортного машиностроения и эксплуатации машин, e-mail: eoYurk@mail.ru

Elena O. Yurkova, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Technology of Transport Engineering and Machine Operation, e-mail: eoYurk@mail.ru



## INTEGRATED LOGISTICS MANAGEMENT BASED ON MULTI-CRITERIA ASSESSMENT OF MACHINERY TECHNICAL CONDITION

G.G. Yadroshnikova, O.A. Shalamova, E.V. Samoiloa, E.O. Yurkova

Siberian Transport University,  
191, Dusi Kovalchuk St., Novosibirsk, 630049, Russian Federation

**ABSTRACT. PURPOSE.** The work assesses the influence degree of various factors causing significant difficulties in planning the technical and production operation of machines and the actual technical state of machinery. **METHODS.** To compensate the shortage of information in the control process of transport and technological complex operation and decision-making for achieving the planned level of machinery technical readiness an expert method was used that allowed to build the a priori ranking of the factors having the most significant effect when controlling complex technical systems. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The Pareto and Ishikawa diagrams were constructed based on the data of West Siberian railway on the failures of nodes and systems of track machinery of a snowplough-class (SP-class). The analysis was given to the causes of failures by the “5 why” method. Based on the opinions of experts eight factors, which could be the root cause of failures, were ranked. The deviations of the sum of ranks from their average sum were determined as well as the specific weights and the place occupied by the factors according to their importance. The variance was calculated and the a priori diagram of ranks was constructed. The value of the concordance coefficient  $W = 0.876$  indicates a high degree of consistency in experts' opinions that confirms the statistical reliability of the materials used in the study. **CONCLUSIONS.** A number of measures aimed at improving the organization of snowplough machinery technical operation has been determined in order to prevent the failure of individual nodes and systems of the track machines of the SP class.

**Keywords:** *transport-technological complexes, technical condition, expert method, failures, factor analysis of failures*

**Information about the article.** Received July 18, 2018; accepted for publication September 19, 2018; available online October 31, 2018.

**For citation.** Yadroshnikova G.G., Shalamova O.A., Samoiloa E.V., Yurkova E.O. Integrated logistics management based on multi-criteria assessment of machinery technical condition. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 10, pp. 248–256. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-248-256. (In Russian).

### Введение

Эффективное управление работоспособностью транспортно-технологических комплексов (далее – ТТК) с целью получения максимальной прибыли и снижения непроизводительных затрат является одной из важнейших задач технической эксплуатации машин. В то же время фактическое техническое состояние парка определяется большим количеством факторов, имеющих вероятностный характер и в той или иной степени обуславливающих значительные трудности в планировании как технической, так и производственной эксплуатации этих машин, т.е. в управлении эксплуатацией машин с учетом переходов разных технических состояний техники.

Целевым техническим состоянием техники следует считать ее нахождение в работоспособном состоянии в процессе выполнения производственных заданий на объектах работ. Потеря рабочего времени,

а, следовательно, потеря доходов предприятий может быть вызвана нахождением машин в других состояниях (плановые технические обслуживания, отказ техники и его устранение, нахождение машин в резерве и др.) [1].

Эффективность управления эксплуатацией ТТК в значительной степени зависит от целесообразности и оптимальности принимаемых управленческих решений по организации и реализации определенных действий по переходу техники в целевое состояние с учетом степени значимости того или иного фактора для возникновения и устранения неполадок или отказов технических средств. То есть организация эксплуатации ТТК, в том числе техническая, должна базироваться на выборе, анализе и воздействии наиболее значимых факторов в рассматриваемой производственной ситуации.



## Совершенствование транспортно-технологических комплексов

Повышение эффективности эксплуатации ТТК может осуществляться за счет совершенствования мониторинга технического состояния ТТК, широкого внедрения диагностирования технического состояния, в том числе дистанционного; создания комплексов вычислительной техники с соответствующим комплектом программного обеспечения; совершенствования научной обоснованности, используемой выходной информации и т.д. [2]. Следовательно, в таких условиях экономическая целесообразность принимаемых специалистами решений и очередности их реализации должна быть обоснована оценкой степени влияния наиболее значимых факторов на управление техническим состоянием ТТК в рассматриваемых производственных ситуациях. Это означает, что все решения должны приниматься на основе принципов системного подхода, сочетающего экономический анализ с приемами математического моделирования, что позволяет получить динамическую картину качественной и численной оценки степени влияния различных факторов на изменение состояния ТТК.

В связи с этим экономическое обеспечение принятия управленческих решений должно начинаться с информационно-технологической подготовки, т.е. со сбора, обработки и анализа достоверной информации о состоянии ТТК, перечня и ранжирования важнейших факторов, влияющих на управление этим состоянием.

На основе этого должны приниматься решения о выполнении определенных действий, приводящих технику в целевое техническое состояние в короткие сроки и они должны быть направлены на организацию первоочередных работ по устранению этих причин.

В свою очередь, обеспечение запланированного уровня технической готовности ТТК в конкретной производственной ситуа-

ции может зависеть от ряда условий, которые можно считать внешними или внутренними для управляемой системы. К внешним условиям можно отнести условия, трудно подлежащие управлению или изменению, это: климатические условия, например, суровые сибирские условия, появление незапланированных заявок на устранение отказа техники, приводящие к нарушению графиков выполнения технических воздействий и др.

К внутренним условиям можно отнести те, которые обеспечиваются внутренними ресурсами на предприятиях и подлежат управлению и изменению (квалификация ремонтных бригад, механооснащенность ремонтного производства, качество выполнения ремонтных работ и т.д.)<sup>5</sup>.

Отсюда следует, что информационно-технологическая подготовка принятия управленческих решений по переходу ТТК в целевое техническое состояние зависит от объема и достоверности полученной информации, характеризующих принятие решений в условиях определенности или неопределенности. Чаще всего в силу различных причин решения приходится принимать в условиях дефицита информации, т.е. информация о техническом состоянии ТТК и условиях осуществления мероприятий по технической эксплуатации является или неполной, или не всегда достоверной.

Для восполнения дефицита информации в процессе управления эксплуатацией ТТК и принятия решений по достижению запланированного уровня технической готовности машин может быть использовано несколько известных методов, одним из которых является метод использования коллективного мнения специалистов или экспертный метод. Именно на экспертной оценке может быть построено априорное ранжирование факторов, оказывающих наиболее значимое влияние в процессе

<sup>5</sup>Шаламова О.А., Самойлова Е.В., Юркова Е.О., Ядрошников Г.Г. Планирование и организация производства на ремонтно-сервисном предприятии: учеб.-метод. пособие. Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2018. 32 с. / Shalamova O.A., Samoilova E.V., Yurkova E.O., Yadroshnikova G.G. Production planning and organization at the repair and service enterprise: Learning aids. Novosibirsk: Publishing house of Siberian Transport University, 2018. 32 p.



управления сложными техническими системами, в том числе транспортно-технологическими комплексами.

Метод априорного ранжирования реализуется на коллективной оценке экспертов уровня значимости предложенных им к рассмотрению факторов, в той или иной степени влияющих на предупреждение или наиболее быстрое устранение отказа техники и ее переход в целевое состояние. При этом методе экспертам предлагается проанализировать ряд факторов, влияющих на достижение целевого состояния, с помощью рангов, отражающих мнение экспертов, исходя из их знаний и опыта, в порядке убывания степени влияния этих факторов. Последовательность ранжирования принятых к рассмотрению факторов, влияющих на принятие решения по скорейшему переходу ТТК в целевое состояние в данной работе проводилось на основе алгоритма, изложенного в работе<sup>6</sup> [3].

Исследование степени влияния различных факторов на техническое состояние машин, переход их из целевого технического состояния в состояние ремонта после отказа техники и принятия наиболее целесообразных решений по организации работ для устранения причин отказов на основе метода экспертной оценки выполнялось с использованием данных Западно-Сибир-

ской железной дороги по факторному анализу отказов путевых машин<sup>6</sup>. В соответствии с этими данными в течение трех месяцев 2018 г. было зафиксировано 170 случаев отказов технических средств специального подвижного состава. В данной работе к рассмотрению были приняты сведения, касающиеся отказов путевых машин класса СМ (снегоуборочные машины). Специалистами филиала были построены диаграммы Парето (рис. 1) и Исикавы (рис. 2) по отказам узлов и систем машин класса СМ и проанализированы причины возникновения отказов методом «5 почему».

На основании факторного анализа диаграмма Исикавы по отказам узлов и систем машин класса СМ были выполнены исследования по ранжированию степени влияния факторов, являющихся возможной причиной возникновения отказов техники, методом экспертной оценки, результаты которых приведены в статье.

К исследованиям были привлечены 8 экспертов – специалистов в данной предметной области. На основании данных специалистов филиала экспертам было предложено к анализу восемь факторов, влияющих на возникновение отказа путевых машин класса СМ, которые рассматривались как первопричины возникновения отказов [3]. К их числу были отнесены следующие факторы:

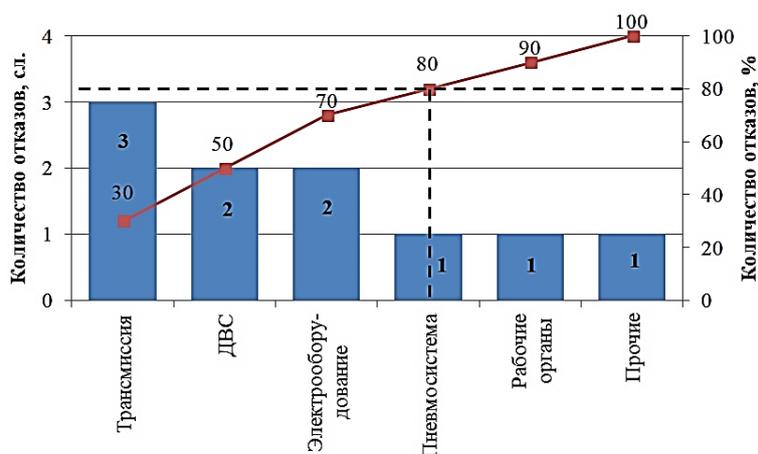


Рис. 1. Диаграмма Парето по отказам узлов и систем машин класса СМ  
Fig. 1. Pareto diagram on failures of SP-class machinery nodes and systems

<sup>6</sup>Отчет по факторному анализу отказов путевых машин за 3 месяца 2018 г. в Западно-Сибирском филиале АО «Калужский завод «Ремпутьмаш». 2018. 28 с. / Report on the factor analysis of track machine failures for 3 months in 2018 in the West-Siberian branch of the Kaluga Plant Remputmash JSC. 2018. 28 p.

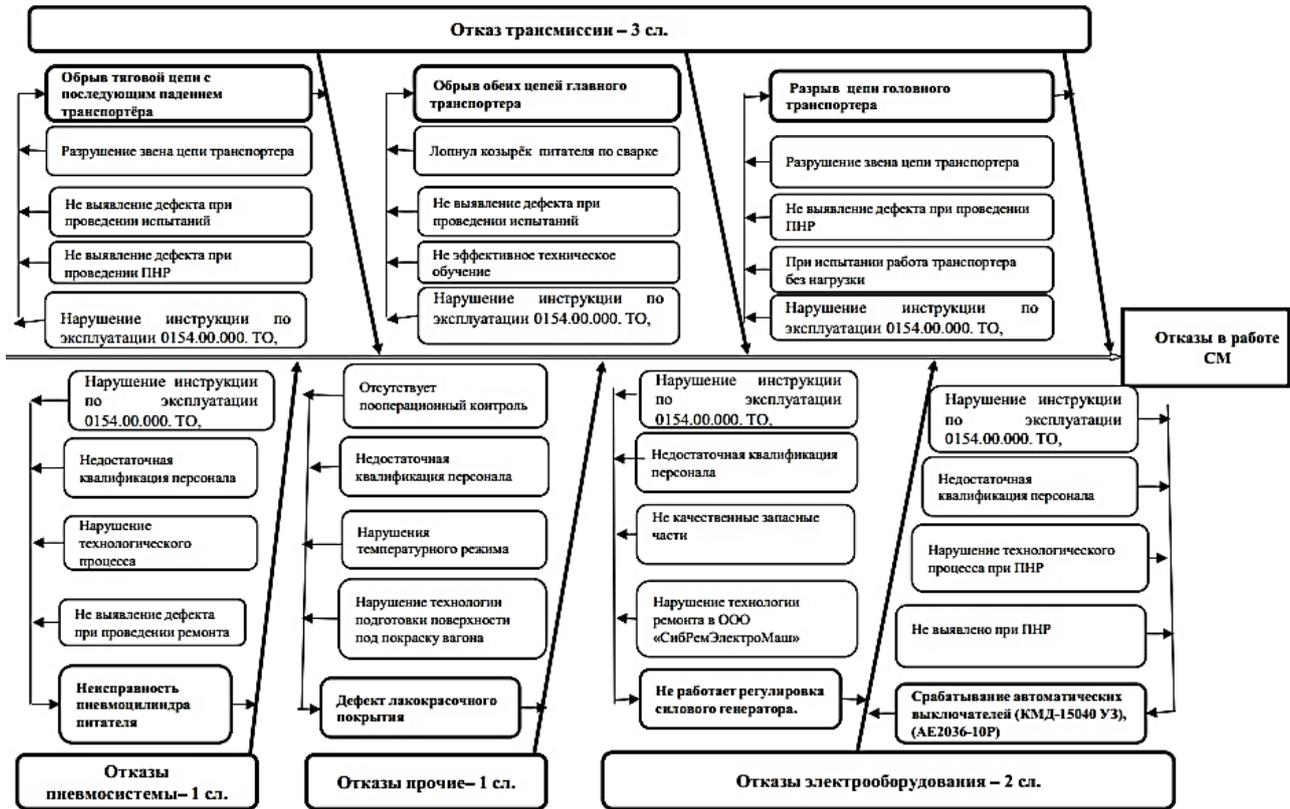


Рис. 2. Диаграмма Исикавы по отказам узлов и систем машин класса СМ  
Fig. 2. Ishikawa diagram on failures of SP- class machinery nodes and systems

- 1) отсутствие пооперационного контроля выполнения ремонта;
- 2) нарушение технологического процесса;
- 3) не выявление дефектов при пусконаладочных работах;
- 4) нарушение инструкции по эксплуатации 0154.00.000. ТО;
- 5) не выявление дефектов при проведении испытаний;
- 6) недостаточная квалификация персонала;
- 7) некачественные запасные части;
- 8) неэффективное обучение рабочих (персонала).

В процессе ранжирования эксперты присваивали ранги каждому фактору  $\alpha_{km}$ , где  $k$  – номер фактора,  $m$  – номер эксперта [3]. Затем определялась сумма рангов по каждому фактору для всех экспертов по формуле (1) и средняя сумма рангов (2)

$$\Delta_k = \sum_{m=1} \alpha_{km}; \quad (1)$$

$$\bar{\Delta} = \frac{\sum_{k=1}^k \Delta_k}{k}. \quad (2)$$

Далее производилось ранжирование факторов по сумме рангов  $\Delta_k$ , причем наиболее значимый с точки зрения степени влияния фактор ставился на первое место, остальные факторы ранжировались по мере увеличения суммы рангов.

Для иллюстрации весомости факторов в соответствии с мнениями экспертов целесообразно построить априорную диаграмму рангов с определением удельных весов факторов по их влиянию на целевую характеристику (в данном случае, на целевое состояние техники). Здесь удельный вес каждого фактора определяется по формуле:

$$q_k = \frac{2(k-N+1)}{k(k+1)}, \quad (3)$$

где  $N$  – место фактора по результатам ранжирования.

Априорная диаграмма рангов аргументирует наиболее целесообразное



решение по восстановлению работоспособности техники и переходу ее в целевое состояние.

При осуществлении ранжирования обычно возникает необходимость выявления степени согласованности мнений экспертов, поскольку эти мнения по оцениваемым характеристикам могут сильно отличаться. Это обуславливается, главным образом, человеческими факторами, такими

как практический опыт, разные научные школы и т. д. Несогласованное ранжирование со статистически недостоверными значениями удельных весов факторов и их рангов может повлечь за собой принятие не вполне точного, не обоснованного или экономически невыгодного управленческого решения [4–14].

**Результаты априорного ранжирования факторов возможного возникновения отказов техники класса СМ**  
**Results of the a priori ranking of factors of possible failure of SP-class machinery**

Факторы	Эксперты								Сумма рангов $\Delta_k$	Отклонение от суммы рангов $\Delta_k^*$	Удельный вес факторов $g_k$	Занимаемое место М (N)	Дисперсия $(\Delta_k^*)^2$
	1	2	3	4	5	6	7	8					
Отсутствие пооперационного контроля выполнения ремонта	7	6	8	7	8	5	8	8	57	- 21	0,056	7	441
Нарушение технологического процесса	5	4	5	6	4	7	6	7	44	- 8	0,111	5	64
Невыявление дефектов при пуско-наладочных работах	3	2	2	3	6	3	1	3	23	13	0,167	3	169
Нарушение инструкции по эксплуатации 0154.00.000. ТО	2	2	1	2	2	2	1	1	12	24	0,222	1	576
Невыявление дефектов при проведении испытаний	5	4	6	1	3	3	5	3	30	6	0,139	4	36
Недостаточная квалификация персонала	1	3	1	3	2	2	2	1	15	21	0,194	2	441
Некачественные запасные части	6	7	5	8	5	6	6	5	48	- 12	0,083	6	144
Неэффективное обучение	7	8	8	6	6	8	7	8	58	- 22	0,028	8	484
Сумма	36	36	36	36	36	36	36	36	288	-	-	-	2355



Поэтому в исследовании необходимо определить согласованность мнений экспертов – конкордацию. Численным выражением согласованности принято считать коэффициент конкордации Кэнделла  $W$ , отражающий отношение общей дисперсии к максимальной дисперсии:

$$W = \frac{12 \cdot S}{m^2(k^3 - k)}, \quad (4)$$

где  $S$  – общая дисперсия как сумма дисперсий по всем факторам:

$$S = \sum_{k=1}^k (\Delta_k^*)^2, \quad (5)$$

где  $\Delta_k^*$  – дисперсия каждого фактора как отклонение суммы рангов от средней суммы рангов по формуле:

$$\Delta_k^* = \Delta_k - \bar{\Delta}. \quad (6)$$

Коэффициент конкордации  $W$  может изменяться от 0 до 1, причем если  $W \geq 0,5$ , то считается, что можно говорить о согласованности мнений экспертов: чем этот коэффициент ближе к 1, тем согласованность мнений выше.

По приведенному выше алгоритму в данном исследовании было проранжировано восемь факторов, которые могли быть первопричиной возникновения отказов. На основании мнений восьми экспертов в работе были определены ранги всех факторов отклонения суммы рангов от средней суммы рангов, удельные веса всех факторов и занимаемое место факторов по степени их значимости, а также дисперсия для всех факторов. Результаты расчетов сведены в таблицу.

По данным таблицы определен коэффициент конкордации  $W$ :

$$W = \frac{12 \cdot 2355}{8^2 \cdot (8^3 - 8)} = \frac{28260}{32256} = 0,876.$$

Такое значение коэффициента конкордации говорит о высокой степени согласованности мнений экспертов, что является подтверждением статистической достоверности используемых в исследовании материалов.

На основании полученных результатов расчетов была построена также априорная диаграмма рангов, приведенная на рис. 3.

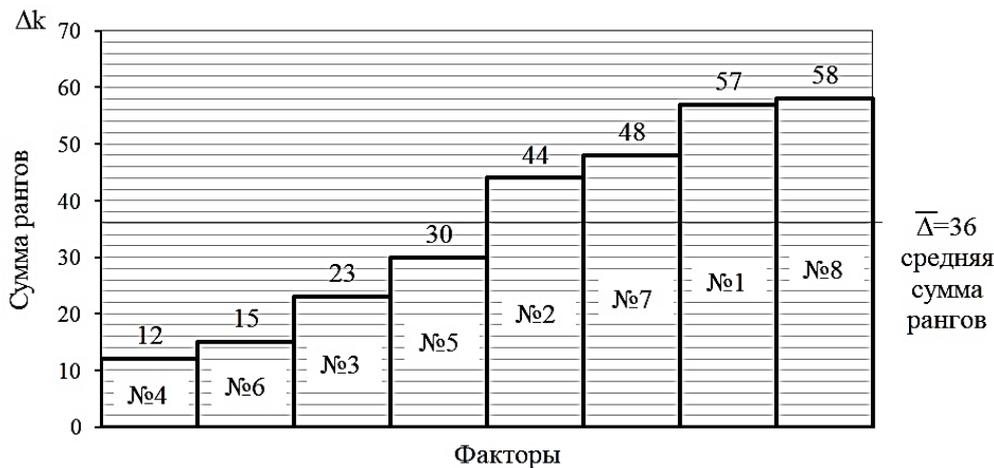


Рис. 3. Априорная диаграмма рангов  
Fig. 3. A priori diagram of ranks

### Выводы

Данные таблицы и априорной диаграммы рангов (рис. 3.) позволяют предварительно наметить основные направления

осуществления мероприятий по организации технической эксплуатации путевой техники, в данном случае путевых машин



класса СМ, для предупреждения проблем, связанных с отказом отдельных узлов и систем данных машин. Судя по результатам исследований, такими направлениями совершенствования организации технической

эксплуатации путевых машин класса СМ являются: нарушение инструкции по эксплуатации 0154.00.000. ТО; недостаточная квалификация персонала; невыявление дефектов при пуско-наладочных работах; невыявление дефектов при проведении испытаний.

### Библиографический список

1. Шаламова О.А., Самойлова Е.В., Юркова Е.О., Ядрошников Г.Г. Способы повышения эффективности эксплуатации транспортно-технологических комплексов с использованием имитационного моделирования // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2017. № 3 (42). С. 12–18.
2. Шаламова О.А., Самойлова Е.В., Юркова Е.О., Ядрошников Г.Г. Повышение эффективности эксплуатации транспортно-технологических комплексов // Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы Международной научно-технической конференции (г. Тюмень, 20 апреля 2017 г.). Тюмень, 2017. С. 466–470.
3. Панкова Л.А., Петровский А.М., Шнейдерман М.В. Организация экспертизы и анализ экспертной информации. М.: Наука, 1984. 120 с.
4. Шаламова О.А., Самойлова Е.В., Юркова Е.О., Ядрошников Г.Г. Совершенствование организации технической эксплуатации машин с использованием экспертного метода при принятии управленческих решений // Актуальная наука. 2018. № 5 (10). С. 35–39.
5. Глухова Л.Р., Фетисова М.А. Факторы, влияющие на эффективность работы строительной техники // Молодой ученый. 2017. № 15 (149). С. 33–35.
6. Федюкин В. К. Управление качеством процессов. СПб.: Питер, 2005. 202 с.
7. Айдын Е.В., Кузнецов С.М., Холомеева Н.В. Оптимизация парков, комплексов и комплектов строительных машин с учетом надежности их работы // Научно-исследовательские публикации. 2014. № 3 (7). С. 11–16.
8. Исаков А.Л., Кузнецова К.С., Кузнецов С.М. Формирование ресурсосберегающих комплексов строительных машин // Строительные и дорожные машины. 2013. № 10. С. 36–39.
9. Вайнштейн И.И., Федотова И.М., Цибульский Г.М., Вайнштейн Ю.В. Процесс восстановления и стратегии эксплуатации в теории надежности технических систем при наработках, распределенных как смесь двух экспоненциальных распределений // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2017. № 2. С. 84–90.
10. Болнокин В.Е., Ивашов Е.Н., Костомаров П.С., Яговцев В.О. Стратегия технического обслуживания систем управления // Вестник машиностроения. 2015. № 7. С. 3–5.
11. Денежкин Г.А., Белобрагин Б.А., Авотынь Б.А. Оценки показателя надежности неремонтируемого образца однократного действия по малым статистическим выборкам // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2017. № 2. С. 76–83.
12. Оганьян Э.С., Волохов Г.М., Гасюк А.С., Фазлиахметов Д.М. Расчетно-экспериментальная оценка ресурса базовых частей локомотивов для обеспечения их безопасной эксплуатации // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2018. № 2. С. 39–43.
13. Сидняев Н.И. Математическое моделирование надежности объектов сложных технических систем // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2003. № 4. С. 24–28.
14. Труханов В.М., Матвеев А.М. Надежность сложных систем на всех этапах жизненного цикла. М.: ООО Изд. Дом «Спектр», 2012. 664 с.

### References

1. Shalamova O.A., Samojlova E.V., Yurkova E.O., Yadroshnikova G.G. Ways to improve the efficiency of transport-technological complexes operation using simulation modeling. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya* [Bulletin of Siberian Transport University], 2017, no. 3 (42), pp. 12–18. (In Russian)
2. Shalamova O.A., Samojlova E.V., Yurkova E.O., Yadroshnikova G.G. Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii transportno-tehnologicheskikh kompleksov [Improving efficiency of transport and technological complex operation]. *Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii "Transportnye i transportno-tehnologicheskie sistemy"* [Proceedings of the International scientific and technical conference "Transport and transport-technological systems", Tyumen', 20 April 2017]. Tyumen', 2017, pp. 466–470. (In Russian)
3. Pankova L.A., Petrovskij A.M., Shnejderman M.V. *Organizaciya ekspertizy i analiz ekspertnoj informacii* [Expertise organization and expert information analysis]. Moscow: Nauka Publ., 1984, 120 p. (In Russian)
4. Shalamova O.A., Samojlova E.V., Yurkova E.O., Yadroshnikova G.G. Improving machinery technical operation organization using expert method when making managerial decisions. *Aktual'naya nauka* [Relevant Science], 2018, no. 5 (10), pp. 35–39. (In Russian)
5. Gluhova L.R., Fetisova M.A. Factors affecting construction equipment operation efficiency. *Molodoy uchenyj* [Young Scientist], 2017, no. 15 (149), pp. 33–35. (In Russian)



6. Fedyukin V.K. *Upravlenie kachestvom processov* [Process quality management]. Saint-Petersburg: Peter Publ., 2005, 202 p. (In Russian)
7. Ajdyn E.V., Kuznecov S.M., Holomeeva N.V. Optimization of parks, complexes and sets of construction cars taking into account reliability of their work. *Nauchno-isledovatel'skie publikacii* [Journal of Scientific Research Publications], 2014, no. 3 (7), pp. 11–16. (In Russian)
8. Isakov A.L., Kuznecova K.S., Kuznecov S.M. Formation of resource-saving complexes of construction machinery. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny* [Construction and Road Building Machinery], 2013, no. 10, pp. 36–39. (In Russian)
9. Vajnshtejn I.I., Fedotova I.M., Cibul'skij G.M., Vajnshtejn Yu.V. Renewal process and operation strategies in the theory of reliability of technical systems under prefailure lives distributed as a mixture of two exponential distributions. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Problems of Mechanical Engineering and Machinery Reliability], 2017, no. 2, pp. 84–90. (In Russian)
10. Bolnokin V.E., Ivashov E.N., Kostomarov P.S., Yagovcev V.O. Policy of maintenance support of control systems. *Vestnik mashinostroeniya* [Mechanical Engineering Bulletin], 2015, no. 7, pp. 3–5. (In Russian)

#### Критерии авторства

Ядрошникова Г.Г., Шаламова О.А., Самойлова Е.В., Юркова Е.О. определили ранги всех факторов отклонения суммы рангов от средней суммы рангов, построили априорную диаграмму рангов, совместно подготовили рукопись и несут ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

11. Denezhkin G.A., Belobragin B.A., Avotyn' B.A. Estimators of the reliability index of a nonrepairable one-shot item by small statistical samples. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Problems of Mechanical Engineering and Machinery Reliability], 2017, no. 2, pp. 76–83. (In Russian)
12. Ogan'yan E.S., Volohov G.M., Gasyuk A.S., Fazliahmetov D.M. Calculated and experimental resource assessment of locomotive basic parts to ensure their safe operation. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Problems of Mechanical Engineering and Machinery Reliability], 2018, no. 2, pp. 39–43. (In Russian)
13. Sidnyaev N.I. Mathematical modeling of complex engineering system object reliability. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Problems of Mechanical Engineering and Machinery Reliability], 2003, no. 4, pp. 24–28. (In Russian)
14. Truhanov V.M., Matveenkov A.M. *Nadezhnost' slozhnyh sistem na vseh etapah zhiz-nennogo cikla* [Reliability of complex systems at all stages of the life cycle]. Moscow: Spektr Publishing House, 2012, 664 p. (In Russian)

#### Authorship criteria

Yadroshnikova G.G., Shalamova O.A., Samoilova E.V., Yurkova E.O. have identified the ranks of all factors of rank sum deviation from the average sum of ranks, built an a priori rank chart, jointly prepared the manuscript and bear the responsibility for plagiarism.

#### Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Уважаемые коллеги!

**Мы приглашаем Вас к участию в нашем журнале в качестве авторов, рекламодателей и читателей и сообщаем требования к статьям, принимаемым к публикации**

I. Статья представляется в электронном и распечатанном видах. Рекомендуемый объем статьи не менее 10 000 знаков.

К статье прилагаются:

1. Экспертное заключение.
2. Название рубрики, в которой должна быть размещена Ваша статья; УДК; название статьи; реферат (аннотация), количество слов в реферате – не менее 200; ключевые слова (4-5); сведения об авторах: название учреждения, его адрес; фамилия, имя, отчество (полностью); ученая степень; звание и должность; контактный телефон и e-mail (**вся информация предоставляется одним файлом**).
3. Статья должна иметь личную подпись автора; на статьях адъюнктов и аспирантов должна стоять также подпись научного руководителя.

II. Текст статьи, сведения об авторах, реферат, ключевые слова, адрес учреждения, контактный телефон и E-mail должны быть также представлены по электронной почте: [vestnik@istu.edu](mailto:vestnik@istu.edu) в виде файла с расширением \*.DOC – документа, построенного средствами Microsoft Word 97 или последующих версий.

При наборе статьи в Microsoft Word рекомендуются следующие установки:

- 1) параметры страницы и абзаца: отступы сверху и снизу – 2 см; слева и справа – 2 см; табуляция – 2 см; ориентация – книжная;
- 2) шрифт – Times New Roman, размер – 12, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;
- 3) при вставке формул использовать Microsoft Equation 3 при установках: элементы формулы выполняются курсивом; для греческих букв и символов назначать шрифт Symbol, для остальных элементов – Times New Roman. Размер символов: обычный – 12 пт, крупный индекс – 7 пт, мелкий индекс – 5 пт, крупный символ – 18 пт, мелкий символ – 12 пт. Все экспликации элементов формул необходимо также выполнять в виде формул;
- 4) рисунки, вставленные в текст, должны быть выполнены с разрешением 300 dpi, B&W – для черно-белых иллюстраций, Grayscale – для полутонов, максимальный размер рисунка с надписью: ширина 150 мм, высота 245 мм и представлено в виде файла с расширением \*.BMP, \*.TIFF, \*.JPG, должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. Схемы, графики выполняются во встроенной программе MS Word или в MS Excel, с приложением файлов (представляемые иллюстрации должны быть четкими и ясными во всех элементах);
- 5) библиографические ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ Р 7.05 2008.

**Внимание! Публикация статьи является бесплатной.**

Стоимость журнала – 500 руб. (без стоимости почтовых расходов).

Журнал включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, утвержденный ВАК Минобрнауки России.

«Вестник ИрГТУ» включен в международный каталог периодических изданий «UlrichsPeriodicals Directory», в базу данных EBSCO, в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU), представлен в электронной библиотеке «Cyberleninka», библиотеке Oxford, Directory of Open Access Journals (DOAJ) рассылается в Российскую книжную палату, ВИНТИ РАН, каждой статье присваивается цифровой индикатор DOI.

**Статьи, опубликованные в журнале «Вестник ИрГТУ», реферируются и рецензируются.**

**Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям.**

По вопросам публикации статей обращаться: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Д-215.

Телефон: (3952) 40-57-56 – Привалова Галина Петровна, ответственный за выпуск,

(3952) 40-58-57 – редакторы.

Факс: (3952) 405-100, e-mail: [pqp@istu.edu](mailto:pqp@istu.edu)

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

# ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Научный журнал  
№ 10 (141) 2018

Редактор Я.В. Макшанцева  
Художественный редактор Е.В. Хохрин  
Ответственный за выпуск Г.П. Привалова  
Перевод на английский язык В.В. Батицкой  
Верстка Н.П. Дзюндзя

Выход в свет 31.10.2018 г. Формат 60x90/8.  
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 32,75.  
Тираж 500 экз. Заказ 270. Поз. плана 3н.

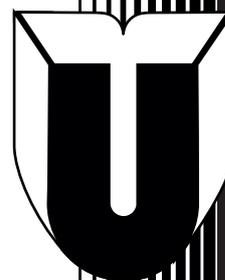
Издание распространяется **бесплатно**

Иркутский национальный исследовательский технический университет  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Отпечатано в типографии Издательства  
ФГБОУ ВО "Иркутский национальный  
исследовательский технический университет"

664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

ИЗДАТЕЛЬСТВО



Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета, 2018

